



# **Forschungspaket: Lärmarme Be- läge innerorts / EP 10: Sensitivi- tät der akustischen Eigenschaf- ten lärmarmen Beläge aufgrund der Variabilität bei der Herstel- lung**

**Paquet de recherche: Revêtements de routes peu-bruyants  
à l'intérieur des localités / EP10: Sensibilité des propriétés  
acoustiques des revêtements peu bruyants à la variabilité  
de leur production**

**Research package: Low noise road surfaces in urban  
situations / EP10: Sensitivity of acoustic properties of low-  
noise pavements related to production variability**

**Müller-BBM Schweiz AG**  
**Guido Kneib, Dr. rer. nat. Geophys.**  
**Daniel Belcher, Dipl.-Phys.**  
**Thomas Beckenbauer, Dr.-Ing.**

**Tecnotest AG**  
**Nenad Radojkovic, Dipl.-Bauing. Univ.**

**Forschungsprojekt ASTRA 2013/004 auf Antrag des Bundesamtes  
für Strassen (ASTRA)**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



# **Forschungspaket: Lärmarme Be- läge innerorts / EP 10: Sensitivi- tät der akustischen Eigenschaf- ten lärmarmen Beläge aufgrund der Variabilität bei der Herstel- lung**

**Paquet de recherche: Revêtements de routes peu-bruyants à l'intérieur des localités / EP10: Sensibilité des propriétés acoustiques des revêtements peu bruyants à la variabilité de leur production**

**Research package: Low noise road surfaces in urban situations / EP10: Sensitivity of acoustic properties of low-noise pavements related to production variability**

**Müller-BBM Schweiz AG**  
**Guido Kneib, Dr. rer. nat. Geophys.**  
**Daniel Belcher, Dipl.-Phys.**  
**Thomas Beckenbauer, Dr.-Ing.**

**Tecnotest AG**  
**Nenad Radojkovic, Dipl.-Bauing. Univ.**

**Forschungsprojekt ASTRA 2013/004 auf Antrag des Bundesamtes für Strassen (ASTRA)**

## Impressum

### **Forschungsstelle und Projektteam**

#### **Projektleitung**

Dr. Guido Kneib, Dr. rer. nat., zuvor Daniel Belcher, Dipl.-Phys.

#### **Projektteam**

Thomas Beckenbauer, Dr.-Ing., Dipl.-Ing. Univ.

Nenad Radojkovic, Dipl.-Bauing. Univ.

### **Begleitkommission**

#### **Präsidentin**

Luzia Seiler

#### **Mitglieder**

Sabine Würmli

Hans-Peter Beyeler

Sophie Hoehn

André Magnin

Olivier Jacobi

Benedikt Eberle

Cyril Durussel

Nicolas Gouneaud

Martin Bürgi (bis 2014)

Hanspeter Gloor

Dejan Lukic

Yves Pillonel

### **KO-Finanzierung des Forschungsprojekts**

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

### **Antragsteller**

Bundesamt für Strassen (ASTRA)

### **Bezugsquelle**

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

# Inhaltsverzeichnis

	<b>Impressum</b> .....	<b>4</b>
	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>7</b>
	<b>Résumé</b> .....	<b>11</b>
	<b>Summary</b> .....	<b>15</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>17</b>
1.1	Organisation, Beteiligte .....	17
1.2	Situation und Aufgabenstellung .....	18
1.3	Stand der Forschung, Forschungsbedarf .....	20
1.4	Vorgehen und Methodik .....	22
<b>2</b>	<b>Belagseinbauten und Messungen</b> .....	<b>25</b>
2.1	Auswahl der Einbauten .....	25
2.2	Untersuchungsparameter .....	26
2.3	Begleitung der Einbauten .....	27
2.3.1	Dokumentation des Einbauvorgangs .....	28
2.3.2	Zusammenstellung der Beobachtungen .....	28
2.4	Durchführung der CPX- und in situ Messungen .....	31
2.5	CPX-Messergebnisse .....	33
2.6	Messergebnisse in situ .....	44
2.7	Ergebnisse der bautechnischen Laboruntersuchungen .....	51
2.8	Variabilität bautechnischer und akustischer Eigenschaften .....	60
<b>3</b>	<b>Zusammenhänge zwischen bautechnischen und akustischen Daten</b> .....	<b>67</b>
3.1	Rollgeräuschestehung und Anforderungen an lärmarme Deckschichten .....	67
3.2	Empirische Zusammenhänge .....	68
3.2.1	Baustellenkorrelationsmatrix .....	71
3.2.2	Parameterkorrelationsmatrix .....	72
3.2.3	Ausgewählte Beobachtungsparameter .....	76
3.3	Bewertung der Ergebnisse und Zusammenhänge .....	82
<b>4</b>	<b>Empfehlungen</b> .....	<b>87</b>
	<b>Anhänge</b> .....	<b>89</b>
	<b>Glossar</b> .....	<b>105</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>109</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>111</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>115</b>
	<b>Projektabschluss</b> .....	<b>117</b>
	<b>Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen</b> .....	<b>121</b>



# Zusammenfassung

## Anlass und Ziele

Das Regelwerk SNR 640 436 enthält Vorgaben für Zusammensetzung und Einbau von semidichtem Asphaltmischgut, welches im Marshallprobekörper Hohlraumgehalte von 12 bis 20 Vol.-% nach Verfahren D haben soll und definiert Belagsklassen in Abhängigkeit vom Grösstkorn und Hohlraumgehalt. Schalltechnische Untersuchungen lärmarmen u.a. semidichter Beläge zeigen, dass die Geräuschminderung von neu eingebauten Belägen ein und desselben Typs, trotz Einhaltung bautechnischer Regeln, deutlichen Schwankungen unterliegt.

Ziel des Forschungsprojektes war, die bautechnischen und akustischen Eigenschaften zweier Typen semidichter lärmarmen Beläge zu untersuchen und hinsichtlich des Einflusses der bautechnischen Variabilität auf die akustische Performanz zu bewerten.

## Projektablauf

Als Untersuchungsobjekte wurden zwei häufig in der Schweiz eingebaute semidichte Belagstypen ausgewählt: SDA 4 (semidichter Asphalt mit 4 mm Grösstkorn) und SDA 8 (semidichter Asphalt mit 8 mm Grösstkorn). Nach dieser Festlegung wurde nach jeweils sechs Einbauvorhaben für jede dieser beiden Belagstypen gesucht. Von den zwölf Einbauten lagen schliesslich elf im Kanton Aargau und einer im Kanton Solothurn.

Die Einbauten wurden jeweils begleitet und die Mischgutlieferung und die Vorgehensweise der Baufirmen dokumentiert. Nach Einbau wurden akustische Messungen durchgeführt und Bohrkerne entnommen. Im Baustoffprüflabor wurden nach einem festen Prüfprogramm Eigenschaften des Bindemittels, des Mischguts und der Bohrkerne untersucht.

Die bautechnischen und akustischen Ergebnisse umfassten spektrale Messgrössen wie Sieblinie, CPX-Spektren, Absorptionsgradspektren und Spektren der Oberflächenrauigkeit und viele Einzahlkennwerte. Spektren und Beobachtungen während des Einbaus wurden jeweils auch in einigen charakteristischen Kennzahlen abgebildet. Für jeden Einbau wurden insgesamt 56 akustische und bautechnische Beobachtungsvariablen (Attribute) zusammengestellt. Neben den Beobachtungsgrössen selbst wurde auch ihre statistische Varianz betrachtet. Über eine Korrelationsanalyse ergaben sich statistische Zusammenhänge zwischen den Baustellen und den Beobachtungsvariablen.

## Projektergebnisse

Beim Einbau gingen die Baufirmen jeweils recht ähnlich und mit einem vergleichbaren Maschinenpark zu Werke. Beobachtete Materialtemperaturen und die Walzregime waren ähnlich, letztere wurden teilweise aber etwas willkürlich umgesetzt.

Bei der Datenanalyse zeigte sich, dass die Hohlraumgehalte teilweise über die Vorgaben der SNR 640 436 für die Belagsklasse B bis in Klasse C hinausgingen. Wie sich später zeigte, war der Kanton Aargau in seinen Ausschreibungen von der SNR 640 436 abgewichen.

Die Standardabweichungen der bautechnischen Variablen zwischen den Einbauten gleichen Belagstyps liegen überwiegend unter 25 Prozent, wobei die typische Schwankungsbreite bei den SDA 4-Einbauten deutlich höher ist als bei den SDA 8-Einbauten. Die höchste Varianz ergibt sich bei den Kennwerten für die Sieblinien. Die Spannen der CPX-Pegel liegen bei beiden Deckschichtvarianten um 2.5 dB. Die Texturparameter der Deckschicht weisen überwiegend Standardabweichungen unter 15 Prozent auf, Absorptionsgrad und Strömungswiderstand liegen mit ihren Standardabweichungen wesentlich höher. Moderate Schwankungen bei bautechnischen Parametern können somit bei einzelnen akustisch relevanten Parametern erheblich grössere Varianzen verursachen.

SDA 4- und SDA 8-Baustellenparameter korrelieren untereinander besser als über die Belagstypen hinweg. Bei der Korrelationsanalyse der einzelnen Beobachtungsgrößen getrennt für die beiden Belagstypen zeigen sich erwartungsgemäss enge positive oder negative Korrelationen bei Attributen, welche verwandte Eigenschaften beschreiben, etwa verschiedene Masse für die Rauigkeit oder Hohlraumgehalte und Dichten. Signifikante Korrelationen gibt es aber auch zwischen bautechnischen und akustischen Größen. So korreliert z.B. der prozentuale Sieblinienanteil bis zum halben Grösstkorn gut mit dem Hohlraumgehalt des Bohrkerns und dieser mit dem Schallabsorptionsvermögen und dieses wiederum mit dem CPX-Pegel. Ein Zusammenhang, der nicht nur statistisch belegt, sondern auch physikalisch sinnvoll ist.

## Schlussfolgerungen

Die Durchführung der Einbauten, der akustischen und bautechnischen Messungen und deren Auswertungen lieferten jeweils in sich konsistente Ergebnisse. Dies gilt auch für die bautechnischen Untersuchungsergebnisse des Partnerlabors und des Bauherrenprüflabors, obwohl die Probenentnahmen an verschiedenen Orten erfolgten. In der vorliegenden Untersuchung war das akustische Verhalten der fertigen Strasse weniger vom Verhalten auf der Baustelle geprägt als vom verbauten Mischgut. Von entscheidender Bedeutung für die akustischen Eigenschaften ist seine Korngrößenverteilung. Der feinkörnige SDA 4 führt zu wesentlich weniger rauen Oberflächen als der SDA 8. In der vorliegenden Stichprobe verfügt der SDA 4 über mehr Hohlraum und ist auch deshalb im Mittel um rund 2 dB leiser als der SDA 8. Die Gestalt der Sieblinien für einen gegebenen Belagstyp variiert in den Stichproben erheblich, wenn auch weit überwiegend innerhalb der weiten Grenzen der SNR 640 436. Damit ist die akustische Performanz bei Bestellung eines SDA 4 oder SDA 8-Belags allein mit Verweis auf die SNR für den Bauherrn nicht hinreichend vorhersehbar.

## Ausblick und Empfehlungen

Der Gestaltungsspielraum der Belagsmischwerke sollte eingeeengt werden, indem für die verschiedenen Hohlraumklassen spezifische Sieblinien vorgegeben werden anstatt der für drei Hohlraumklassen gültigen Kurven der derzeitigen SNR 640 436. Es sollte der akkumulierte Kornanteil entlang der Sieblinie bis zum halben Grösstkorn mindestens 25 M.-% betragen. Ein Abweichen von der strikten Einteilung in feste semidichte Belagsklassen wie in der SNR 640 436 sollte vom Regelwerk toleriert werden, um den technischen Fortschritt nicht unnötig einzuengen. Vorgaben für den Hohlraumgehalt von semidichten Belägen und für ihre praktische Umsetzung sollten eindeutig und ausschliesslich auf das Ausmessverfahren (Verfahren D) bezogen sein. Das CPX-Verfahren und die hier verwendeten Prüfverfahren zur Charakterisierung der akustisch relevanten Oberflächeneigenschaften haben sich technisch und von ihrer Aussagekraft her sämtlich bewährt und können für zukünftige Anwendungen weiterempfohlen werden, ebenso die Strategie, mehrere in situ Messpunkte und Bohrkernentnahmestellen aufgrund von repräsentativen Belagsabschnitten im CPX-Pegelschrieb festzulegen. Das akustisch motivierte Streben nach einer Deckschicht mit wenig rauer Oberfläche und einem Netzwerk verbundener Hohlräume für die Schallabsorption sollte in einem SDA 4 oder SDA 8 zu niedrigen Reifen-Fahrbahn-Geräuschen (CPXP-Pegeln) führen, wenn folgenden Zielvorgaben eingehalten werden: Akkumulierter Anteil der Sieblinie von mindestens 25 % beim halben Grösstkorn, Texturgestaltfaktoren von über 80 %, niedrige vom Grösstkorn abhängige Effektivwerte der Oberflächenrauigkeit (beim SDA 4  $RMS=0.4$  mm, beim SDA 8  $RMS=0.6$  mm), ein breitbandiges Absorptionsspektrum mit Absorptionsmaxima von mindestens 0.2, moderate Strömungswiderstände von unter  $15'000$  Pa s/m, Bohrkernhohlraumgehalte nach Verfahren D von mindestens 12 Vol.-%.

Aus wirtschaftlichen und lärmspezifischen Gründen erscheint es unbedingt empfehlenswert, die zeitliche Entwicklung der hier untersuchten Deckschichten in einem ähnlichen Untersuchungsprogramm weiterhin zu beobachten, denn nur so kann beurteilt werden, wie sich die Varianz beim Einbau auf die akustische und bautechnische Dauerhaftigkeit auswirkt. Eine präzisere Erfassung der Vorgänge während des Einbaus über automatisch aufgezeichnete Maschinendaten, Einbautemperaturen und von georeferenzierten Walzübergängen durch die Baufirmen ist mittelfristig erstrebenswert und könnte die Ursache

von einbaubedingten bautechnischen und akustischen Inhomogenitäten entlang von Strassenneubauten erklären und damit helfen, diese künftig zu reduzieren.



## Résumé

### Conjoncture et objectifs

La règle SNR 640 436 contient des exigences pour la composition et l'installation des enrobés semi-denses; elle définit, selon la procédure D, une teneur en vides des éprouvettes Marshall de 12 à 20 % vol. ainsi que les classes de revêtements en fonction de la granulométrie et de la teneur en vides. Les études acoustiques des revêtements peu bruyants, entre autres les revêtements semi-denses, montrent cependant que, pour des revêtements nouvellement construits et du même type, et bien que conformes aux règles de construction, la réduction du bruit diffère nettement.

L'objectif du projet de recherche était d'étudier les propriétés techniques et acoustiques de deux types de revêtements semi-denses peu bruyants afin d'en spécifier les propriétés et d'évaluer l'influence de la variabilité technique sur la performance acoustique.

### Déroulement du projet

En tant qu'objets d'étude, deux types de revêtements semi-denses, qui sont souvent installés en Suisse, ont été choisis: SDA 4 (4 mm de granularité) et SDA 8 (8 mm de granularité). Une fois cette sélection effectuée, on a recherché six projets d'installation pour chacun de ces deux types de revêtements. Sur douze installations, onze d'entre elles se trouvent dans le canton d'Argovie et une dans le canton de Soleure.

Nous avons assisté à chaque installation, les livraisons d'enrobés et les procédures des entreprises de constructions ont été documentés. Après l'installation, des mesures acoustiques ont été réalisées et des carottes ont été prélevées. Les propriétés des liants, de l'enrobé et de la carotte ont été étudiés dans un laboratoire d'analyses des matériaux de construction selon un programme d'étude prédéfini.

Les résultats techniques et acoustiques comportent les mesures spectrales telles que la courbe granulométrique, les spectres CPX, les spectres d'absorption, les spectres de rugosité de texture et beaucoup d'indices caractéristiques. Chaque spectre a été représenté en un indicateur caractéristique, tout comme les observations lors des constructions. 56 variables d'observation acoustiques et techniques (attributs) ont été collectées pour chaque installation. En parallèle des données d'observation elles-mêmes, on a également considéré leurs variances statistiques. Avec une analyse de corrélation, on a constaté des relations statistiques entre les sites et les variables d'observation.

### Résultats du projet

Lors des installations, les entreprises de construction travaillaient de manière très similaire avec des parcs de machines comparables. Les températures des matériaux observées et les régimes de roulement étaient similaires, ces derniers étaient néanmoins parfois mis en œuvre de manière quelque peu aléatoire.

L'analyse des données montre que les teneurs en vides allaient parfois au-delà des exigences de la SNR 640 436 pour les classes de revêtement B à C. Il est apparu plus tard que le canton d'Argovie s'était écarté de la SNR 640 436 pour son appel d'offres.

Les écarts-types des variables techniques entre les installations des mêmes types de revêtements se situent pour la plupart en dessous de 25 %, la marge de fluctuation typique pour les installations SDA 4 est significativement plus élevée que pour les installations SDA 8. On trouve la variance la plus élevée dans les caractéristiques des courbes granulométriques. Les marges des niveaux CPX se situent pour les deux variantes de revêtements à 2.5 dB. Les paramètres de texture du revêtement présentent des écarts-types de moins de 15 %, les écarts-types du coefficient d'absorption et de la résistance à l'écoulement de l'air sont nettement plus élevés. Des variations modérées dans les pa-

paramètres techniques peuvent donc provoquer de grandes variances dans certains paramètres acoustiques pertinents.

Les paramètres de construction de SDA 4 et SDA 8 présentent d'avantage de corrélations que les types de revêtements. Dans l'analyse de corrélation des données d'observation individuelles où les deux types de revêtement étaient séparés, apparaissent comme prévu des corrélations étroites positives ou négatives pour les attributs qui décrivent des caractéristiques connexes, comme une masse différente pour la rugosité ou bien la teneur en vides et la densité. Il existe également des corrélations significatives entre les caractéristiques techniques et acoustiques. Ainsi, le pourcentage de courbe granulométrique, par exemple, corrèle très bien et ce, jusqu'à la moitié de la dimension maximale des grains, avec la teneur en vides de la carotte, cette dernière avec la capacité d'absorption acoustique, et cette dernière avec le niveau CPX, c'est une relation qui n'est pas seulement prouvée statistiquement mais également physiquement.

## Conclusions

La mise en œuvre de l'installation, les mesures acoustiques et techniques et leurs évaluations ont livré chacune des résultats cohérents. Cela est aussi valable pour les résultats des tests techniques de notre laboratoire partenaire et des laboratoires des maîtres d'œuvre, bien que l'échantillonnage ait été réalisé à des endroits différents. Dans la présente étude, le comportement acoustique des routes finies a été moins influencé par la mise en œuvre sur le chantier que par le mélange d'enrobé. La distribution de la taille des particules est d'une importance cruciale pour les propriétés acoustiques. La fine granulométrie SDA 4 conduit à des surfaces beaucoup moins rugueuses que le SDA 8; dans l'échantillon, le SDA 4 possède plus de teneur en vides, c'est pourquoi il est moins bruyant d'en moyenne 2 dB que le SDA 8. La forme des courbes granulométriques pour un type de revêtement donné varie dans l'échantillon de manière significative, bien que restant à l'intérieur des limites larges de la SNR 640 436. Ainsi, la performance acoustique avec pour seule référence la SNR n'est pas clairement prévisible pour le client lors de la commande de revêtement SDA 4 ou SDA 8.

## Perspectives et recommandations

La flexibilité dans la conception des mélanges d'enrobés devrait être réduite, par des exigences spécifiques sur la courbe granulométrique pour chacune des classes de teneur en vides au lieu de celles portant sur trois classes de teneur en vides de l'actuelle SNR 640 436. La portion granulométrique accumulée le long de la courbe granulométrique jusqu'à la dimension maximale des grains devrait être d'au moins 25 %m. Un écart par rapport à la division stricte et fixe en classes de revêtements semi-denses comme c'est le cas dans la SNR 640 436 devrait être toléré par la réglementation, pour ne pas restreindre inutilement les avancées technologiques. Les exigences pour la teneur en vides des revêtements semi-denses et leur mise en œuvre pratique devraient être clairement et uniquement basées sur la méthode de mesure (méthode D). La méthode CPX et les méthodes d'analyses utilisées ici pour caractériser les propriétés du revêtement acoustiquement pertinentes ont été prouvées techniquement et leur pertinence a été validée, elles peuvent donc être recommandées pour des applications futures, tout comme la stratégie consistant à déterminer plusieurs points de mesure in situ ainsi que des prélèvements de carottes à l'aide de tronçons de revêtement représentatifs du niveau CPX. L'objectif acoustique d'un revêtement avec peu de rugosité en surface et un réseau de vides pour l'absorption du bruit devrait conduire, dans un SDA 4 ou SDA 8 à un faible bruit de roulement pneu/route (niveau CPX) lorsque les objectifs suivants sont atteints : une part d'accumulation sur la courbe granulométrique d'au moins 25 % de la moitié de la dimension maximale des grains, un facteur de forme de la texture de plus de 80 %, des valeurs effectives inférieures pour la rugosité de la surface dépendant de la dimension maximale des grains (pour SDA 4  $RMS=0.4$  mm, pour SDA 8  $RMS=0.6$  mm), un spectre d'absorption large avec un maximum d'absorption d'au moins 0.2, une résistance à l'écoulement de l'air modérée de moins de 15'000 Pa s/m, des teneurs en vides des carottes selon la méthode D d'au minimum 12 %vol.

Pour des raisons d'une part économiques et d'autre part liées spécifiquement au bruit, il semble fortement recommandé de continuer à suivre l'évolution dans le temps des revêtements analysés ici dans un programme de recherche similaire; c'est uniquement ainsi qu'on pourra évaluer dans quelle mesure la variance lors de l'installation affecte sa pérennité technique et acoustique. Il serait souhaitable à court terme, lors des installations, de collecter plus précisément les données des opérations par des enregistrements automatiques sur ordinateur, parmi elles les températures d'installation et les transitions de roulement géoréférencées par les entreprises de construction afin d'expliquer la raison des inhomogénéités techniques et acoustiques le long des routes nouvellement construites, et, à l'avenir, de contribuer à les réduire.



## Summary

### Motive and objective

The technical code SNR 640 436 contains technical rules for composition and the construction of semi-dense asphalt mixes that yield void contents between 12 to 20 vol.-% in the Marshall specimen measured by method D and it defines classes of pavements according to maximum grain size and void content. Acoustic investigations of low-noise, for example semi-dense pavements show that the degree of noise reduction of newly built roads of the same type display considerable fluctuations even if they meet the codes of construction.

Purpose of the research project is to investigate constructional and acoustic properties of two types of semi-dense low-noise pavements and to evaluate the impact of the constructional variability on the acoustic performance.

### Scope of work

Two different types of semi-dense pavements that are regularly built in Switzerland had been selected: SDA 4 (semi dense asphalt, 4 mm maximum grain size) und SDA 8 (semi dense asphalt, 8 mm maximum grain size). Six construction sites for each pavement type were selected. 11 in 12 construction sites are located in canton Aargau, one in canton Solothurn.

Both the delivery of the asphalt mix and the road construction work were observed and documented. After completion of the paving process acoustic measurements were carried out and drill cores were drawn. Properties of the binder, the asphalt mix and of the cores were investigated in a material testing laboratory.

Road engineering as well as acoustic results comprise spectral parameters like grading curves of the mineral material, CPX-spectra, spectra of the sound absorption coefficient and the surface roughness as well as many singular parameters. The spectral content is quantified by single number descriptors in the same way as the observations from the construction sites are represented. For each site 56 acoustic and road engineering observation variables (attributes) were compiled. Apart from the variables themselves their statistical variances were evaluated. A correlation analysis led to statistical relations between construction sites and the observation variables.

### Project results

During construction the companies went about in a similar way and with comparable machinery. The observed material temperatures and the rolling (compaction) patterns were similar. However, the rolling was partially carried out in a rather arbitrary way.

Data analysis indicated that the void content of the probes exceeded the limits of the SNR 640 436 for pavement category B and partially reached category C. Later on it turned out that the Aargau canton's tender did not comply with SNR 640 436.

The standard deviations of the road engineering variables between the sites with the same pavement type are mainly below 25 percent, where the typical span has been considerably wider for the SDA 4 surfaces than for the SDA 8 surfaces. The largest variance was found for the grading curve parameters. CPX levels deviate by 2.5 dB. Texture parameters of the surfaces usually provide standard deviations below 15 percent, absorption coefficient and airflow resistivity show much larger standard deviations. Moderate fluctuations in constructional parameters can cause much larger variations in certain acoustically relevant parameters.

The SDA 4 and the SDA 8 construction site parameters correlate better within their pavement class than across the pavement types. Correlation analyses of the observation variables carried out separately for each pavement type display close positive or negative

correlations for attributes that describe related properties such as surface roughness or void content and bulk density. However, significant correlations also exist between road engineering and acoustic quantities. For example the percentage of the grading curve up to half the maximum grain size correlates well with the void content of the core and the absorption coefficient and consequently with the CPX-level, a relation that is not just supported by statistics but also by physical reasoning.

## Conclusions

The ways of road construction, the acoustic and road engineering measurements and their evaluations provided consistent results. This also holds for the material and structure testing results collected by the project partner testing laboratory and the road builder's laboratory, although sampling took place at different locations. In this investigation the acoustic behaviour of the road surface rather depends on the properties of the asphalt material than on the quality of the road construction work. The grain size distributions are crucial for the acoustic performance. The small grain size SDA 4 lead to considerably less rough surfaces than the SDA 8, as expected. Additionally, the SDA 4 show higher void contents. Therefore, the SDA 4 surfaces are about 2 dB quieter than the SDA 8 ones. The shapes of the grading curves for a given pavement type vary considerably, although mostly within the wide limits given in the SNR 640 436. As a result, the acoustic performance of a SDA 4 or SDA 8 pavement cannot be expected sufficiently well if the call for tender just refers to the SNR.

## Recommendations and look ahead

The degrees of freedom for an asphalt mixing plant should be limited in such way that specific grading curves for the mineral aggregate are introduced for each of the void content classes in order to replace the currently valid curves shown in the SNR 640 436 that apply to all of the three void content classes. The portion of grains accumulated along the grading curve up to half the maximum grain size should be at 25 m.-% at least. Deviations from the strict separation between the semi-dense pavement classes in the SNR 640 436 should be tolerated in order to avoid interference with technological progress in the future. Limits for the void content of semi-dense road surfaces and for their realizations should refer unambiguously and exclusively to the measurement method D. The CPX method and test procedures to quantify acoustically relevant surface characteristics have proven to work well and can be recommended for the future, as well as the strategy to select several in situ measurement points and drill core extraction points according to pavement sections which turned out to be acoustically representative in the CPX measurements. The acoustically motivated aim to obtain a road surface with moderate roughness and a network of connected voids for sound absorption should yield low tyre/road noise (CPX levels) on SDA 4 and SDA 8 pavements provided that the following conditions are met: accumulated portion of grains at least 25 % at half the maximum grain size, texture shape factors above 80 %, low RMS-values of the surface texture that depend on the maximum grain size (SDA 4:  $RMS=0.4$  mm, SDA 8:  $RMS=0.6$  mm), a broad-band absorption spectra with maxima of at least 0.2, moderate airflow resistance below 15'000 Pa s/m, void content of the drill core according to method D of at least 12 vol.-%.

For economic and noise specific reasons it appears recommendable to monitor the development of the road pavements that had been investigated over time in a similar investigation program. Only then it can be derived how the variance of parameters at the time of construction maps onto acoustic and constructional durability. A more precise monitoring of the construction process via automatically recorded machinery data, material temperatures and geo-referenced rolling work by the road constructors is desirable in the medium term. Moreover, it could help to explain the causes of construction-related structural and acoustical inhomogeneities along new road pavements and thereby could help to reduce them in the future.

# 1 Einleitung

Im Schlussbericht des EP1 „Formulation des revêtements peu bruyants (ASTRA 2010/010)“ [10] verweist die Forschungsstelle auf den Bedarf, die Sensitivität der akustischen Eigenschaften lärmarmen Beläge bezüglich der Variabilität bei der Herstellung nicht nur im Labor (Forschungsziel EP1), sondern auch bei der Produktion und beim Einbau zu untersuchen. Entsprechende Ergebnisse sollen der Normierung lärmarmen Beläge sowie der Validierung der technischen Referenzblätter dienen, welche die Belagslieferanten und Bauunternehmer den Bauherren zur Verfügung stellen. Schalltechnische Untersuchungen lärmarmen u.a. semidichter Beläge zeigen, dass die Geräuschminderung von neu eingebauten Belägen ein und desselben Typs, trotz Einhaltung bautechnischer Regeln, deutlichen Schwankungen unterliegt. Aus diesem Grund wurde das vorliegende Forschungsprojekt definiert.

Ziel des Forschungsprojektes war, die bautechnischen und akustischen Eigenschaften zweier Typen semidichter lärmarmen Beläge zu untersuchen, welche von verschiedenen Belagsaufbereitungsanlagen produziert und von verschiedenen Baufirmen eingebaut wurden und diese hinsichtlich des Einflusses der bautechnischen Variabilität auf die akustische Performanz zu bewerten.

## 1.1 Organisation, Beteiligte

Das Forschungspaket „Lärmarme Beläge innerorts“ ist in drei Teilprojekte untergliedert (Abb. 1):

- TP1: Forschung und Innovation
- TP2: Test und Validierung
- TP3: Langzeitüberwachung

Die Phase 1 im Teilprojekt TP1 beinhaltet fünf Einzelprojekte:

- EP1: Rezepturen für lärmarme Beläge
- EP2: Labortechnische Bestimmung der Dauerhaftigkeit lärmarmen Beläge
- EP3: Betrieb und Unterhalt lärmarmen Beläge
- EP4: Labormethoden für die Bestimmung akustischer Eigenschaften lärmarmen Beläge
- EP5: Verbesserung der Genauigkeit akustischer Messmethoden

Die Phase 2 im Teilprojekt TP1 wurde später gestartet und beinhaltet drei Einzelprojekte:

- EP7: Innovative, lärmarme Beläge für den potentiellen Einsatz in der Schweiz
- EP8: Akustische Wirkung betrieblicher Reinigungsmassnahmen bei lärmarmen Belägen
- EP10: Sensitivität der akustischen Eigenschaften lärmarmen Beläge aufgrund der Variabilität bei der Herstellung

Der vorliegende Bericht umfasst die Untersuchungsergebnisse des EP10. Die Einbettung innerhalb des Forschungspaketes „Lärmarme Beläge innerorts“ und des Teilprojektes „TP1: Forschung und Innovation“ ist in Abb. 1 dargestellt.

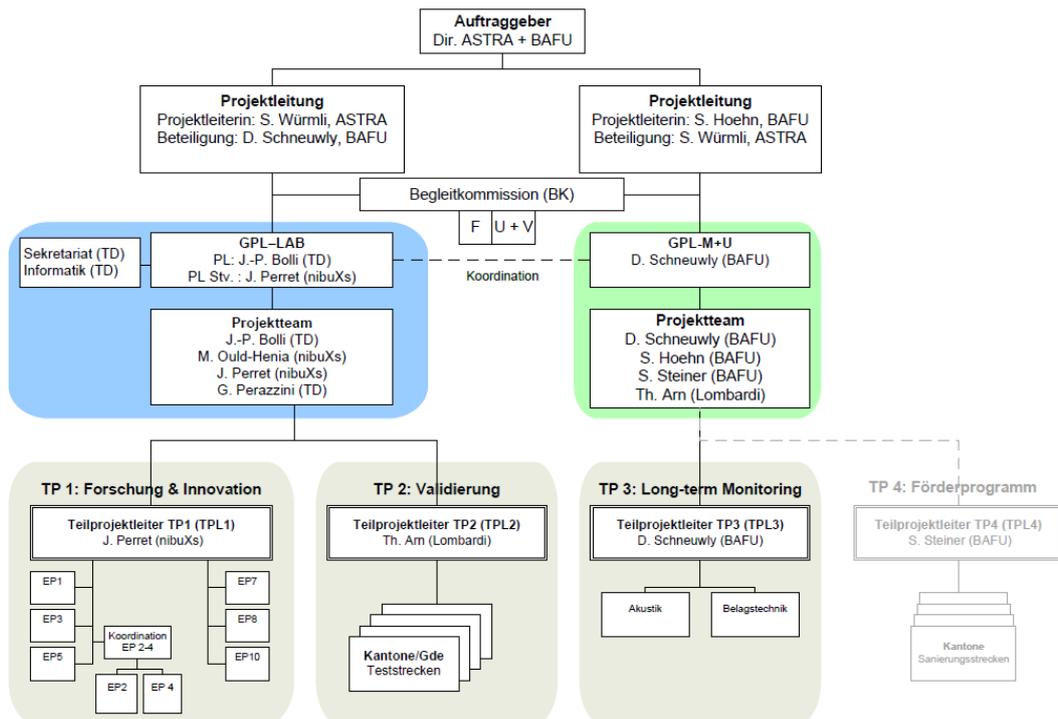


Abb. 1 Organigramm des Forschungspakets „Lärmarme Beläge innerorts“.

## 1.2 Situation und Aufgabenstellung

Schalltechnische Untersuchungen lärmarmen Beläge zeigen, dass die anfängliche Geräuschminderung von Belägen ein und desselben Typs, trotz normativ festgelegter bautechnischer Regeln für die Herstellung des Mischguts und den Einbau, deutlichen Schwankungen unterliegt. Die bautechnischen Regeln beinhalten nach wie vor keine Anforderungen an die funktionale Eigenschaft der Rollgeräuschminderung und beziehen auch keine Prüfungen akustischer Eigenschaften mit ein. Die durch einen bestimmten Belagstyp erzielbare Rollgeräuschminderung wird bei Einhaltung des bautechnischen Regelwerks als gegeben angenommen, gewissermassen als zwangsläufiges Ergebnis des Bauens nach Norm betrachtet.

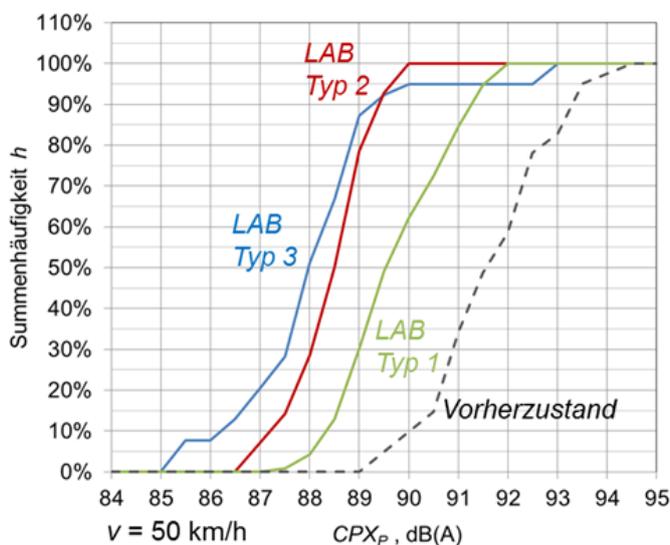
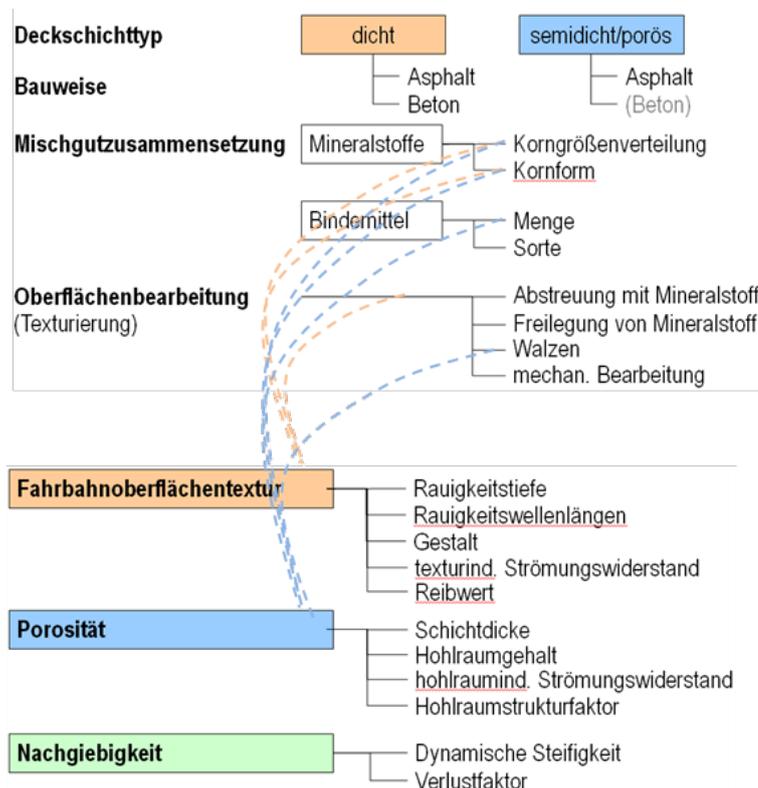


Abb. 2 Summenhäufigkeit von  $CPX_p$ -Werten von drei unterschiedlichen lärmarmen Belagstypen (LAB) innerorts, jeweils ein Jahr nach Einbau gemessen. Quelle: Interne Auswertung Müller-BBM einer Vielzahl von eigenen Messungen in verschiedenen Projekten.

Bauweisenabhängige Abweichungen des Geräuschminderungswertes von  $\pm 1.5$  dB(A) bis zu  $\pm 3$  dB(A) vom Erwartungswert für einen nach Regelwerk gebauten Deckbelag spiegeln jedoch die schalltechnischen Unwägbarkeiten wider, die beim Bauen nach Regelwerk entstehen können. Abb. 2 zeigt die Summenhäufigkeit von CPX<sub>p</sub>-Pegeln für 50 km/h auf neu eingebauten Deckschichten verschiedener Typen lärmarmen Beläge (LAB). Die Darstellung basiert auf insgesamt 169 Strassenabschnitten mit LAB. Die Herstellung von Fahrbahnbelägen unterliegt vielfältigen Einflüssen während der Mischgutherstellung, der Lieferung des Mischguts an die Baustelle und des Einbaus. Trotz der bautechnischen Regeln, die die Zusammensetzung und die Verarbeitung von Asphalt normativ beschreiben, kommt es in der Realität regelmässig zu deutlichen Abweichungen der gelieferten Eigenschaften von den von einer bestimmten Bauweise zu erwartenden Eigenschaften. Dies betrifft insbesondere auch die akustische Performanz von lärmarmen Deckbelägen. Die nur postkartengrosse Fläche des Reifen-Fahrbahn-Kontakts, in dem die Rollgeräusche angeregt werden, erfordert eine durchgehend gleichmässige und genaue Einhaltung vorgegebener Merkmale der Fahrbahnoberflächentextur (alle Belagstypen), der Porosität (semiporöse und offenporige Beläge) und der Nachgiebigkeit (elastische und poroelastische Beläge). Die Textur der Fahrbahnoberfläche trägt massgeblich zur Schwingungsanregung des rollenden Reifens und damit zur mechanischen Geräuschregung von Reifen-Fahrbahn-Geräuschen bei. Porosität beeinflusst im Wesentlichen die Anregung von Luftströmungsgeräuschen im Reifen-Fahrbahn-Kontakt sowie die Abstrahlung nach aussen [11][12].



**Abb. 3** Schematische Darstellung der Zusammenhänge von Mischgutzusammensetzung und Bauweise mit Fahrbahneigenschaften.

Praxisgerechte Deckbeläge bestehen bislang ausnahmslos aus weitgehend starren Schichten, weshalb nennenswerte Nachgiebigkeiten, die zur Rollgeräuschminderung beitragen könnten, hier keine Rolle spielen. Diese akustisch bedeutsamen Merkmale hängen ihrerseits wiederum eng mit bautechnischen Eigenschaften der Deckschicht zusammen. Abb. 3 zeigt die Systematik der bautechnischen Merkmale, die für die Rollgeräuschentstehung wichtig sind (oben) und die Eigenschaften der fertigen Deckschicht, die die akustischen Merkmale Textur, Porosität und Nachgiebigkeit charakterisieren (unten).

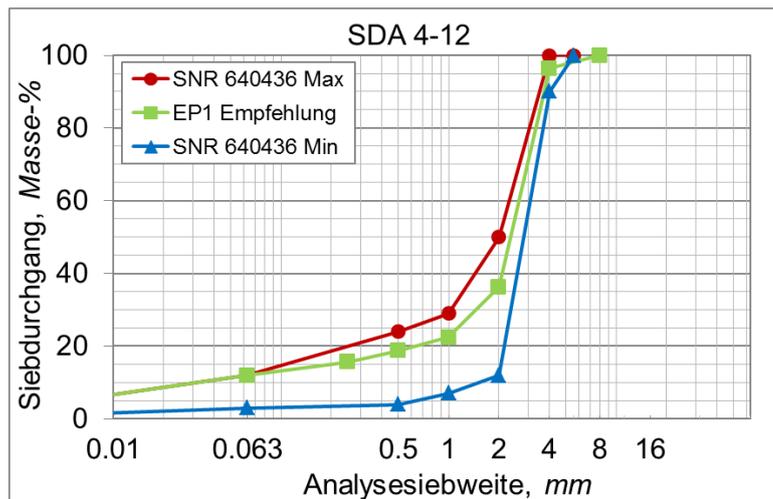
Die bautechnischen Regeln sind aus Praktikabilitätsgründen weit gefasst und sehen beispielsweise bei der Sieblinie (Kornzusammensetzung) und der Bindemittelzusammensetzung Mengen- und Qualitätstoleranzen vor, um produktionsbedingte Streuungen zulassen zu können und den Markt der in Frage kommenden Baustoffquellen und Baustofflieferanten nicht zu sehr einzuschränken. Die Einbauqualität unterliegt der Logistik, der Maschinenteknik und den organisatorischen und handwerklichen Fähigkeiten des Personals der Baufirma, aber auch wetterbedingten Unwägbarkeiten. Oft bestehen bei den am Bau Beteiligten auch einfach nur Kenntnis- oder Erfahrungsdefizite zur Beeinflussung und Variabilität der volumetrischen und mechanischen Eigenschaften lärmarmen Beläge und deren mögliche Auswirkungen auf die akustischen Eigenschaften. All dies führt bei günstigem oder ungünstigem Aufeinandertreffen der beschriebenen Variabilitäten, trotz Regelwerk, zu den oben genannten Streuungen der akustischen Performanz.

In diesem Zusammenhang stellt sich deshalb die Frage, wie stark die akustischen Eigenschaften von den einzelnen Herstellungsparametern, sowohl bei der Mischgutzusammensetzung als auch beim Einbau, abhängen und ob es Bauweisen gibt, die akustisch weniger anfällig gegenüber Schwankungen der bautechnischen Randbedingungen sind als andere. Das Ziel ist die Quantifizierung der Variabilität der massgeblichen Einflussfaktoren und deren Auswirkung auf die Akustik. Daraus können Empfehlungen oder Vorgaben bei der Herstellung lärmarmen Beläge abgeleitet werden, die zu reproduzierbareren akustischen Eigenschaften führen.

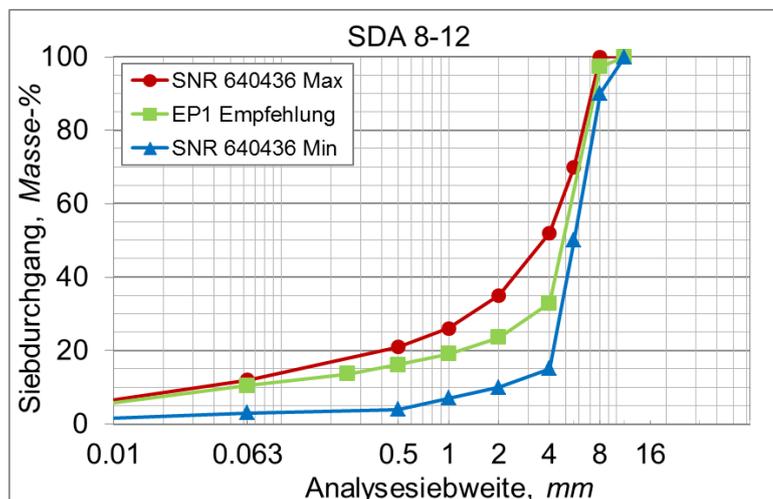
### 1.3 Stand der Forschung, Forschungsbedarf

Im Juni 2013 wurde vom Schweizerischen Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS) die Regel SNR 640 436 "Semidichtes Mischgut und Deckschichten SDA – Festlegungen, Anforderungen, Konzeption und Ausführung" veröffentlicht [3]. Mit dieser SNR wurden aktuelle Kenntnisse und Erfahrungen für den Bau lärmarmen semidichteren Asphaltfahrbahnbeläge (SDA) in einem bautechnischen Regelwerk zusammengefasst. Die Regel SNR 640 436 legt Anforderungen an den Einbauprozess, das Mischgut, Hohlraumgehalt, Schichtdicken, usw. der eingebauten Deckschicht fest, enthält jedoch keine Angaben in Bezug auf akustische Eigenschaften. In einer Revision von September 2015 hat die VSS die Nomenklatur für SDA-Beläge verändert und die dichteren Belagsvarianten mit Hohlraumgehalten bis hinunter zu 6 Volumenprozent ausgeklammert [4]. Besonders häufig werden Deckschichten vom Typ SDA 4B (SDA 4-12) und SDA 8B (SDA 8-12) eingebaut. Die neueren Teilbezeichnungen 4-12, bzw. 8-12 stehen für das Grösstkorn (4 mm, bzw. 8 mm) und den mittleren Hohlraumgehalt nach Ausmessverfahren (12 Volumenprozent). Dies entspricht in der älteren Nomenklatur der Hohlraumklasse B (10 bis 14 Volumenprozent im Marshallprobekörper). Beläge der Hohlraumklasse C weisen im Marshallprobekörper Hohlraumgehalte zwischen 14 und 18 Vol.-% auf. Die Hohlraumgehalte beziehen sich hier und auch in der SNR 640 436 auf Werte, die nach dem Ausmessverfahren (Verfahren D, [5]) bestimmt wurden. Bei dichten Belägen kommt eher das Tauchwägetverfahren zum Einsatz (Verfahren B, [5]), welches tiefere Messwerte liefert. Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben sehen Regelwerke wie auch die SNR 640 436 erhebliche Toleranzbereiche für die verschiedenen Materialparameter vor. Man beachte den Toleranzbereich von etwa 35 Prozentpunkten der Korngrössenverteilung für den Siebdurchgang beim Abknickpunkt 2 mm (SDA 4, *Abb. 4*) und 4 mm (SDA 8, *Abb. 5*).

*Abb. 4* und *Abb. 5* enthalten auch eine Sieblinie, welche im Rahmen einer Forschungsarbeit im TP1 zur Rezeptierung von Mischgut für lärmarme Beläge innerorts empfohlen wurde (Einzelprojekt EP1) [9][10]. Im Schlussberichts der ETH Lausanne vom Februar 2016 werden – neben anderen – folgende wichtige Schlussfolgerungen für die Herstellung von lärmarmen Fahrbahnbelägen gezogen, die der genannten Norm teilweise entgegenstehen (die Forschungsarbeit bezieht sich auf Beläge mit Maximalkorngrössen von 4 bis 8 mm und Hohlraumgehalten von 12 bis 16 Vol.-%):



**Abb. 4** Sollwerte für die Korngrößenverteilung SDA 4 nach SNR 640 436.



**Abb. 5** Sollwerte für die Korngrößenverteilung SDA 8 nach SNR 640 436.

- Die volumetrische Mischgutrezeptur ist der bislang praktizierten gravimetrischen vorzuziehen.
- Als Verdichtungsverfahren im Labor sind Walzen-, Gyrator- und Marshallverdichter geeignet.
- Die Bestimmung des Hohlraumgehalts sollte mit dem geometrischen Verfahren erfolgen, weil dieses bei höheren Hohlraumgehalten genauer ist.
- Hochwertige Materialien sind vorzuziehen (harte Körner mit hohem Polierwiderstand, polymermodifizierte Bindemittel).
- Die Homogenität der eingesetzten Materialien muss zu jedem Zeitpunkt der Mischgutherstellung im Labor und Mischwerk gewährleistet sein. Dies betrifft insbesondere auch die einzelnen Kornfraktionen des Gesteinskörnungsgemischs.
- Leichte Änderungen in der Sieblinie können erhebliche Auswirkungen auf Hohlraumgehalt und Bindemittelgehalt und damit sowohl auf die mechanische als auch die akustische Performanz des Deckbelags haben. Dies gilt in besonderem Masse für feinkörnige Beläge wie den SDA 4.
- Die Sieblinie des SDA 4 soll bei 2 mm einknicken, die des SDA 8 bei 4 mm. Die Bindemittelgehalte sollten zwischen 6.5 bis 6.8 M.-% (SDA 4) und 6.2 bis 6.5 M.-% (SDA 8) liegen; diese Werte sind höher als in der SNR 640 436 angegeben.
- Im Labor gemessene Schallabsorptionsgrade hängen von der Art und Homogenität der Verdichtung ab.

- Akustische Prüfungen sollten in das Regime von Eignungs- und Kontrollprüfungen einbezogen werden, wobei Laboruntersuchungen (etwa mit dem Impedanzrohr) kein vollwertiger Ersatz für in situ Messungen sein können.

Diese wichtigen Ergebnisse basieren ausschliesslich auf Simulationen und Laboruntersuchungen. Die Belagsoptimierung im Rahmen des EP1 konzentrierte sich auf die mechanischen Belageigenschaften, die Belagsakustik spielte eine untergeordnete Rolle. Es gibt bislang dagegen keine systematischen Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen der baupraktischen Herstellung und der akustischen Performanz von lärmarmen Belägen, die diese Ergebnisse der EP1-Forschungsarbeit berücksichtigen bzw. ergänzen. Darin liegt der Forschungsbedarf für das hier durchgeführte Vorhaben.

## 1.4 Vorgehen und Methodik

Gesucht waren bautechnische Faktoren, die Einfluss auf die akustischen Eigenschaften des Endprodukts haben. Hierzu bedurfte es systematischer quantitativer Untersuchungen und einer Dokumentation des hergestellten Produkts, von der Baustoffanlieferung bis zur fertigen Deckschicht. Dazu zählen u.a.:

- Beobachtung und Dokumentation der Mischgutlieferung und des Einbaus
- Dokumentation des Walzregimes und der eingesetzten Baumaschinen
- Dokumentation des Temperaturverhaltens von angeliefertem Mischgut und der Deckschicht während der Verdichtung mit Hilfe von Wärmebildaufnahmen
- Erweiterte bautechnische Kontrollprüfung am Mischgut und an der fertigen Schicht
- Bestimmung schalltechnisch relevanter Oberflächeneigenschaften der fertigen Schicht
- Schalltechnische Kontrollprüfung der fertigen Schicht

Massgabe für das Vorhaben ist das "Bauen nach Regelwerk", hier nach SNR 640 436 [3][4]. Die Eigenschaften der in der Praxis realisierten bautechnischen Produkte Mischgut und fertige Deckschicht wurden sowohl an den Sollwertvorgaben der SNR als auch an den im Forschungsvorhaben EP1 [10] formulierten materialtechnischen und baupraktischen Anforderungen für optimierte lärmarme Beläge gemessen. Um Rückschlüsse auf die akustische Performanz der Beläge ziehen zu können, wurden auf allen Strecken in situ Oberflächeneigenschaften bestimmt und schalltechnische Messungen durchgeführt.

Im Vorfeld wurden Gespräche mit verschiedenen Mischgutherstellern und Tiefbauämtern geführt, um herauszufinden, welche Bauweisen und Produkte für lärmarme Fahrbeläge in der Schweiz häufig eingesetzt werden. Da die Realisierung eines über den gesamten Prüfabschnitt homogenen Hohlraumgehalts bautechnisch anspruchsvoll ist, solche Beläge akustisch jedoch sehr wirksam sind, standen Beläge mit einem Hohlraumgehalt von mindestens 12 Vol.-% im Fokus dieses Forschungsvorhabens. In Abstimmung mit der Projektleitung wurden zwei Produkte der Mischgutgruppe SDA ausgewählt. Die Belagsbezeichnung beinhaltet neben der Abkürzung SDA noch die Zahlenwerte für das Grösstkorn und den charakteristischen Hohlraumgehalt der Marshallprobekörper. Gegenwärtig werden in der Schweiz an lärmsensitiven Streckenabschnitten oftmals und nach Empfehlung der VSS Beläge mit einem Grösstkorn von 4 mm und 8 mm und einen Marshallprobekörper-Hohlraumgehalt von 10 Vol.-% bis 14 Vol.-% (Hohlraumgehaltsklasse B nach [3], bzw. -12 [4]) eingebaut. Beläge mit der Bezeichnung SDA 4B und SDA 8B (nach Norm SN 640 436 von 2013), bzw. SDA 4-12 und SDA 8-12 (nach Norm SN 640 436 von 2015) sollten im Rahmen dieses Projektes ursprünglich untersucht werden. Wie sich zeigte wurden auch Beläge der Hohlraumklasse C eingebaut (SDA 4-16 und SDA 8-16). Die bautechnischen Eigenschaften der ausgewählten Beläge sind in *Tab. 1* zusammengefasst,

**Tab. 1** Bautechnische Eigenschaften der ausgewählten Beläge nach SNR 640 436.

Eigenschaft	SDA 4-12 (SDA 4B)	SDA 8-12 (SDA 8B)	SDA 4-16 (SDA 4C)	SDA 8-16 (SDA 8C)
Hohlraumgehalt Marshallprobekörper, Vol.-%	10 ... 14	10 ... 14	14 ... 18	14 ... 18
Einzelwerte des Hohlraumgehalts der eingebauten Schicht, Vol.-%	10 ... 20	9 ... 17	14 ... 24	13 ... 23
Mittelwerte des Hohlraumgehalts der eingebauten Schicht, Vol.-%	10 ... 18	10 ... 16	14 ... 22	14 ... 20
Indirekte Zugfestigkeit ITSR, %	≥ 70	≥ 70	≥ 70	≥ 70
Dosierter Bindemittelgehalt, Masse-%	≥ 6.0	≥ 5.8	≥ 6.0	≥ 5.8
Schichtdicke, mm	20 ... 35	25 ... 40	20 ... 35	25 ... 40

Die zu untersuchenden Versuchsp Parameter setzen sich aus den Herstellungsparametern und den akustischen Eigenschaften zusammen. Aus Tab. 2 gehen die zu prüfenden Herstellungsparameter und deren Zusammenhang mit den wesentlichen akustischen Eigenschaften der Deckschicht nach einem einfachen Bewertungsschema hervor. Aus dieser schematischen Einstufung leiten sich die untersuchten Kennwerte ab.

**Tab. 2** Unterscheidung und Relevanz der Herstellungs- und Messparameter. ++ = sehr relevant, + = relevant.

Phase	Parameter	Textur (mechanische Geräuschanregung)	Porosität (aerodynamische Geräusch anregung und Abstrahlung)
Mischgut- zusammen- setzung	Grösstkorn	++	+
	Sieblinie	++	++
	Kornform, Kantigkeit	++	+
	Bindemittelgehalt		++
	Füllergehalt	+	+
Einbau	Hohlraumgehalt		++
	Schichtdicke		++
	Einbautemperatur	+	+
	Walzregime	++	+
	Kompetenz LAB	+	++
	Maschinenteknik	+	+
	Meteorologie	+	++
Akustik	Texturspektrum	++	+
	Absorptionsgrad		++
	Strömungswiderstand	+	+
	Nahfeldgeräusch (CPX)	++	++

Entsprechend dem Untersuchungskonzept wurden zwölf Einbauten untersucht. Die Auswahl der Einbaustrecken sollte zum einen eine gewisse statistische Vielfalt repräsentieren und zum anderen aber nicht zu heterogen sein, damit Quervergleiche noch sinnvoll möglich blieben. Die Auswahl richtete sich nach folgenden Kriterien:

1. je sechsmal SDA 8 und sechsmal SDA 4 (wenigstens zwei verschiedene Beläge),
2. nicht zu viele verschiedene Mischwerke (damit ein Vergleich möglich wird),
3. möglichst früher Einbautermin im Kalenderjahr (damit der Belag noch vor dem Herbst eingefahren werden konnte und Reserven für eine allfällige Änderung der Auswahl in der Bausaison vorhanden war),
4. nicht zu viele verschiedene Baufirmen (damit ein Vergleich möglich wird),
5. nicht zu kurze Strecken (mindestens 200 m), damit Mischgutentnahme- und Messpunkte und CPX-Messungen statistisch hinreichend unabhängig sein können.

## 2 Belagseinbauten und Messungen

### 2.1 Auswahl der Einbauten

Aufgrund der Auswahlkriterien aus Abschnitt 1.4 und nach Befragen kantonaler Tiefbauämter und zahlreicher Baufirmen über geplante Einbauvorhaben wurden zwölf Einbauten ausgewählt, jeweils sechs Einbauten in 2015 und 2016. Nach Angaben der Beteiligten wurde jeweils sechsmal SDA 4 (Tab. 3) und SDA 8 (Tab. 4) ausgewählt. Die Beschränkung auf wenige Mischwerke und Baufirmen implizierte eine regionale Verteilung der Baustellen, weil die Mischwerke nur regional beliefern und die meisten Baufirmen nur regional tätig sind. Von den zwölf Einbauten liegen 11 im Kanton Aargau und einer im Kanton Solothurn. Auf manchen Baustellen wurden Teile der Bautrups und die eingesetzten Baumaschinen wiederholt angetroffen. Mit der endgültigen Auswahl sind die Auswahlkriterien aus Abschnitt 1.4 recht gut umgesetzt, denn die meisten Belagswerke und Baufirmen sind mehrfach vertreten (Tab. 5). Die Baufirmen beauftragten jeweils immer die gleichen Mischwerke. Die beteiligten Baufirmen sind in einer Danksagung aufgelistet (Anhang I). Baufirmen und Mischwerke werden im Bericht und bei der Datenauswertung nur durch die Ziffern aus Tab. 5 gekennzeichnet.

Im Laufe der Datenauswertung zeigte sich, dass die zunächst im Sinne der Festlegungen in der SNR 640 436 als SDA 4B und SDA 8B eingestuft Einbauten im Kanton Aargau von ihren Hohlraumgehalten her eher als SDA 4C und SDA 8C einzuordnen sind. Der Bauherr hatte sich in den Ausschreibungen für die Bauvorhaben nicht streng auf die SNR 460436 bezogen, sondern davon abweichend einen Hohlraumgehalt zwischen 10 % und 14 % nach Tauchwägung (Verfahren B) gefordert. Daraus leitet sich, je nach Umrechnungsformel zwischen den beiden Verfahren zur Hohlraumbestimmung, ein Hohlraumgehalt nach Ausmessverfahren (Verfahren D) zwischen etwa 12 Vol.-% bis 18 Vol.-% ab, d.h. die Einbauten im Kanton Aargau liegen im Grenzbereich zwischen den Hohlraumklassen B (12 Vol.-%) und C (16 Vol.-%) und neigen in der Tendenz eher zu letzterer Klasse. Aus pragmatischen Gründen und um Verwirrungen zu vermeiden wird in diesem Bericht im Folgenden von SDA 4 und SDA 8 gesprochen, in dem Bewusstsein, dass es sich bei 11 Einbauten um einen „SDA 4B bzw. SDA 8B Version Kanton Aargau“ handelt. Der SDA 8 Einbau in Oensingen (SO) wurde vom kantonalen Tiefbauamt explizit als SDA 8-12 gemäss SNR 640 436 ausgeschrieben.

**Tab. 3** Einbauten von SDA 4.

Ort	Dottikon	Niederlenz	Rudolfstetten-Friedlisberg	Küttigen	Baden	Künten-Eggenwil
<b>Kanton</b>	AG	AG	AG	AG	AG	AG
<b>Strasse</b>	K387 Bahnhofstrasse	K248 Hauptstrasse	K127 Bernstrasse (nur Etappe 1)	K470 Bibersteinerstrasse	K268 Äussere Mellingerstrasse	K271 Eggenwil
<b>Länge</b>	370 m	450 m	650 m	1270 m	950 m	290 m
<b>Schichtdicke</b>	0.030 m	0.035 m	0.030 m	0.030 m	0.030 m	0.030 m
<b>Baufirma</b>	2	4	1	1	2	4
<b>Belagswerk</b>	2	4	1	1	2	4
<b>Einbaudatum</b>	16.08.2015	30.08.2015	01.07.2016	08.07.2016	10.07.2016	16.08.2016
<b>Uhrzeit</b>	13 – 17 Uhr	8 – 12 Uhr	9 – 14 Uhr	8 – 13 Uhr	8 – 14 Uhr	6 – 9 Uhr

**Tab. 4** Einbauten von SDA 8.

Ort	Hallwil	Schöffland	Oensingen	Waltenschwil	Aarau	Remetschwil Busslingen
<b>Kanton</b>	AG	AG	SO	AG	AG	AG
<b>Strasse</b>	K250 Dürrenäsch- erstrasse	K108 Suhrental- strasse	T5 Haupt- strasse	K362 Wohler- strasse	Industrie- str. West	K271/415
<b>Länge</b>	550 m	600 m	125 m	185 m	280 m	340 m
<b>Schichtdicke</b>	0.030 m	0.030 m	0.030 m	0.030 m	0.030 m	0.030 m
<b>Baufirma</b>	1	2	3	4	5	1
<b>Belagswerk</b>	1	2	3	4	4	1
<b>Einbau- datum</b>	12.07.2015	30.07.2015	03.08.2015	13.09.2015	03.07.2016	24.09.2016
<b>Uhrzeit</b>	8 – 14 Uhr	9 – 14 Uhr	19 – 22 Uhr	10 – 13 Uhr	8 – 12 Uhr	8 – 11 Uhr

**Tab. 5** Häufigkeit der Belagswerke und Baufirmen bei den untersuchten Einbauten.

<b>Belagswerk</b>	1	2	3	4	
<b>Anzahl der Beteiligungen</b>	4x	4x	3x	1x	
<b>Baufirma</b>	1	2	4	3	5
<b>Anzahl der Beteiligungen</b>	4x	3x	3x	1x	1x

## 2.2 Untersuchungsparameter

In Diskussion mit dem beteiligten Baustoffprüflabor und der Projektleitung wurde eine Auswahl von bautechnischen und akustischen Prüfparametern getroffen, die für die akustischen Eigenschaften der eingebauten Deckschicht relevant sind und hier für jeden begleiteten Einbau zu analysieren waren. Das Untersuchungsprogramm umfasste jeweils mindestens die aufgelisteten Messgrössen aus Tab. 6. In der Tabelle sind auch die zugehörigen schweizerischen Normen (SN) und europäischen Normen (EN) aufgeführt, soweit vorhanden. Einzig die Messung des akustischen Absorptionsgrads in situ ist noch nicht normativ geregelt, wird aber von Müller-BBM seit vielen Jahren erfolgreich nach internen Vorgaben eingesetzt. Die Parameterliste umfasst spektrale Werte bei denen ein Parameter als Funktion der Längendimension oder Frequenz bestimmt wird (Sieblinie, CPX-Pegel, Absorptionsgrad- und Texturspektrum) und Einzahlwerte.

**Tab. 6** Bautechnische und akustische Parameter und zugehörige Prüfnormen.

Prüfobjekt	Aufgabe	SN	EN
<b>Bindemittel</b>			
	Penetration	670511	1426
	Erweichungspunkt R & K	670512	1427
	Penetrationsindex	670202-NA	12591
	elastische Rückstellung	670547	13398
<b>Mischgut</b>			
	Marshall-Versuch	670430	12697-30
		670434	12670-34
	Rohdichte im Pyknometer	670405	12697-5
	Bindemittelrückgewinnung	670403	12697-3
	Korngrößenverteilung, Sieblinie	670902-1	933-1
	Bindemittelgehalt	670402	12697-2
		670401	12697-1
	Module de richesse	640431-1	13108-1
	Stabilität S	670434	12697-34
	Tangentialer Fließwert Ft	670434	12697-34
<b>Bohrkerne</b>			
	BK Schichtdicke	670436	12697-36
	Schichtenverbund Leutner	670461	
	Raumdichte Ausmessverfahren	670406	12697-6
	Raumdichte Tauchwägeverfahren	670406	12697-6
	Hohlraumgehalt + Verdichtungsgrad berechnen	670429	12697-29
<b>Deckschicht in situ</b>			
	Frequenzgang der Oberflächenrauigkeit		13473, 1 - 3
	Maximale Rauigkeit und deren Wellenlänge		13473, 1 - 3
	Mittlere Profiltiefe (MPD und ETD)		13473, 1 - 3
	Textur-Gestaltfaktor (g)		13473, 1 - 3
	Effektivwert der Rauigkeit (RMS)		13473, 1 - 3
	Frequenzgang des Schallabsorptionsgrads		
	Schallabsorptionsmaximum und dessen Frequenz		
	Mittlerer Schallabsorptionsgrad		
	Luftströmungswiderstand		29053
	Mittlere CPXP-, CPXH-, und CPXI-Pegel und deren Homogenität und Terzspektrum	Anhang 1c	11819-2.2

## 2.3 Begleitung der Einbauten

Die zwölf Einbauten wurden jeweils beobachtet und dokumentiert. Eine ausführliche Beschreibung des typischen Einbauvorgangs mit Fotos und Wärmebildaufnahmen findet sich im Anhang I.1.1.1III Grosse Unterschiede in der Vorgehensweise wurden an den

einzelnen Baustellen nicht beobachtet, gewisse Unterschiede aber schon. Die Beobachtungen sind in den Tabellen *Tab. 7* und *Tab. 8* aufgelistet und unter 2.3.2 kommentiert.

### 2.3.1 Dokumentation des Einbauvorgangs

Die Begleitung der Einbauten der Asphaltdeckschichten vor Ort umfasste jeweils folgende Tätigkeiten, die teilweise von Müller-BBM und vom Prüflabor Tecnotest durchgeführt wurden:

1. Kontaktaufnahme mit der Bauleitung und Anmeldung der Beobachtung
2. Fotografieren der Mischgutlieferscheine, Gespräche mit anliefernden Lastwagenfahrern
3. Entnahme von vier Mischgutproben entlang der Einbaustrecke, Temperaturmessung mit einer Fühlernadel im Mischgut
4. Aufnahme von Maschinendaten von Asphaltfertigern und Walzen, Fotografieren der Typenschilder
5. Fotodokumentation des Einbaus
6. Wärmebildaufnahmen vom Mischgut bei Anlieferung, in der Fertigermulde, bei Probenahme
7. Wärmebildaufnahmen vom eingebauten Belag, insbesondere unmittelbar hinter dem Fertiger
8. Dokumentation des Walzregimes, Gespräche dazu mit dem Personal der Baufirmen
9. Beobachten des Einbauvorgangs, Notieren von Auffälligkeiten

### 2.3.2 Zusammenstellung der Beobachtungen

Im Jahr 2015 wurden im Rahmen dieses Untersuchungsprojekts EP10 insgesamt sechs SDA-Belagseinbauten begleitet, zweimal SDA 4 und viermal SDA 8. In 2016 wurden vier Einbauten von SDA 4 und zwei Einbauten von SDA 8 begleitet. Die Daten der SDA 4 Einbauten sind in *Tab. 7* zusammengefasst, die für SDA 8 in *Tab. 8*.

Die Vorgehensweise bei den Einbauten unterschied sich vergleichsweise wenig. Es waren jeweils zwei Asphaltfertiger im Einsatz, die jeweils in weitgehend paralleler Fahrt mit gut 2 Metern pro Minute die beiden Richtungsfahrestreifen einbauten. Ihre Fertigermulden wurden von aus Einbaurichtung anfahrenden Lastwagen befüllt, die jeweils 20 bis 26 t anlieferten, was für einige zehn Meter Einbaustrecke ausreichte. Hinter dem Einbaubalken fuhren mehrere Walzen vor und zurück, um den Belag zu verdichten. Hier gab es aber Unterschiede der praktizierten Walzschemata, so lag die stichprobenartig geprüften Anzahl der Überrollungen pro Flächeneinheit zwischen 4 und 15 und die Anzahl der Vibrationen/Oszillationen unterschied sich ebenfalls. Die eingesetzte Gerätetechnik war ähnlich. Die Asphaltfertiger hatten jeweils Betriebsmassen von knapp unter 20 t, die Walzen zum dynamischen Verdichten 9 bis 11 t, die statischen Walzen 9 bis 13 t bei Walzenbreiten zwischen 1.3 und 2.0 m. Eine tabellarische Übersicht über die Beobachtungen während der Einbauten zeigen die *Tab. 7* und *Tab. 8*. Der Einbau in Busslingen konnte nicht beobachtet werden, weil nach mehrfacher Verschiebung der letztendliche Einbautermin nicht rechtzeitig bekanntgegeben wurde. Daher fehlen hier einige Angaben.

Die Bauarbeiter waren überwiegend darüber orientiert, welchen Belag sie einzubauen und wie sie dabei vorzugehen hatten. Das Walzregime war ihnen bekanntgemacht worden, wurde aber meist mehr aus dem Zufall und Gefühl heraus umgesetzt denn streng quantitativ. Einzig in Baden waren computerkontrollierte Walzen im Einsatz, welche Oberflächentemperatur und Verdichtungsgrad anzeigten und dem Fahrer konkrete Handlungsanweisungen gaben. Bei Mischgutlieferung in einem Thermo-Silo lag die Liefertemperatur tendenziell etwas höher, gross war der Unterschied gegenüber Lieferung in einer abgedeckten Lade aber nicht. Die Fahrzeit des Mischguts vom Asphaltmischwerk zur Baustelle lag in einer weiten Spanne zwischen 5 und 40 Minuten, weil die Baufirmen in der Regel nicht unbedingt das nächstgelegene Mischwerk beauftragten, sondern andere Kriterien dabei auch eine Rolle spielen, wie die Zugehörigkeit zur gleichen Firmen- gruppe.

**Tab. 7** Beobachtungen bei SDA 4 Einbauten.

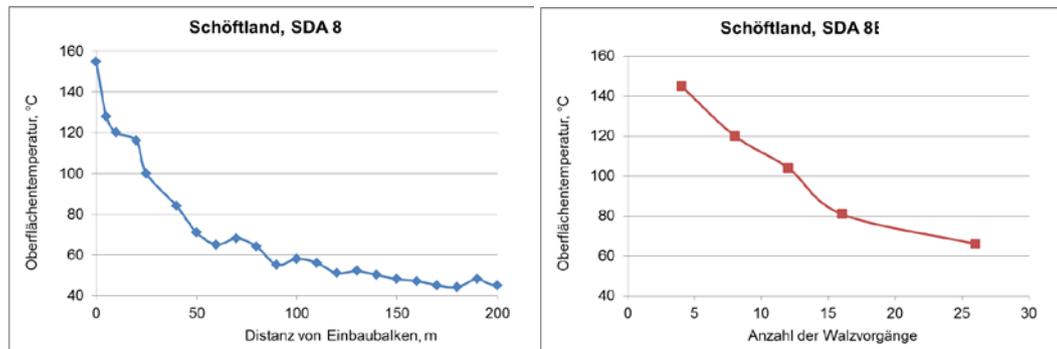
Ort	Dottikon	Niederlenz	Rudolfstetten	Küttigen	Baden	Eggenwil
<b>Walzenfahrzeuge (vorne, hinten)</b>	2x 10t, 1x 12t	8+10t, 2x 14t	4x9t, 1x11t	4x 9t, 1x 11t	3x 10t, 3x 10-12t	3x 10t, 2x 10-12t
<b>LW Mischgut</b>	Lade Kasten	Lade Kasten	Thermo-Silo	Thermo-Silo	Lade Kasten	
<b>Fahrzeit Mischgut</b>	15 – 20 Min.	20 – 25 Min.	10 – 15 Min.	30 – 40 Min.	20 Min.	20 – 25 Min.
<b>Lufttemperatur, °C</b>	20 – 24	25 – 33	23 – 29	20 - 22	20 – 26	19 - 24
<b>Anliefer- Temp., °C</b>	130 – 175	120 – 180	160 -190	130 - 180	125 – 180	
<b>Probenahme- Tem., °C</b>	140 – 170	130 – 165	160 - 180	155 - 170	165 – 170	152 - 159
<b>Temp. n. Fertiger, °C</b>	135 – 155	130 – 160	150 - 170	160 - 170	155 – 170	
<b>Walzvorgänge (vorne, hinten)</b>	4-6x 10t mit ½ Vibration 12.5t statisch	4x 8/10t mit 1x Vibration 14t statisch	8x mit 9 t + 1-2x vibrieren + 1-2x oszillieren 5x11t statisch	5-8x mit 9 t + 1-2x vibrieren + 1-2x oszillieren 9t + 11t statisch	10x 10t + 2x vibrieren (je nach Compu- teranzeige) 10t + 12t statisch	10t: 3x vibrieren 12t statisch
<b>Anzahl Einbauten</b>	8-9 SDA	4 SDA	>4 SDA	>5 SDA	> 10 SDA	7 SDA
<b>Aussagen über / Besonderheiten beim Einbau</b>	wie SMA8, nicht zu viel Vibration.  Nach Regen wurde 5 h gewartet mit Beginn	Überprüfung mit Troxler- Sonde	Nahwalzen bis 50m hinter Fertiger; Oszillieren kann nur Walze auf südlicher Fahrbahn	Fahrer achten sehr auf Fahrweg; dynam. Walzen bis 60m hinter Fertiger; stat. Walzen dahinter	3 Nahwalzen bis 80m hinter Fertiger, Fernwalzen bis 50m; zum Vibrieren mindestens 2-3m Abstand hinter Fertiger	Nahwalzen: Mit Troxler- Sonde Dichte messen, um Fahrer auf zusätzliches Vibrieren anzuweisen und auf Mischgut- schwankungen zu reagieren

**Tab. 8** Beobachtungen bei SDA 8 Einbauten.

Ort	Hallwil	Schöffland	Oensingen	Walten- schwil	Aarau	Busslingen
<b>Walzenfahrzeuge (vorne, hinten)</b>	2x 10t, 2x 8t	2x 10t, 3x 8-12t	2x 5t, 2x 10t	8+10t, 2x 14t	2x 11t, 1x 13t	3x9t, 1x11t
<b>LW Mischgut</b>	Thermo-Silo	Lade Kasten	Lade rund	Lade Kasten	Lade Kasten, Thermo-Silo	Thermo-Silo
<b>Fahrzeit Mischgut</b>	30 Min.	15 Min.	5 – 7 Min.	20 – 25 Min.	20 Min.	20 – 30 Min.
<b>Lufttemperatur, °C</b>	28 – 30	15 – 22	25	19 – 21	18 – 21	16 - 20
<b>Anliefer- Temp., °C</b>	130 – 190	145 – 175	130 – 180	140 – 180	120 – 180	125 – 185
<b>Probenahme- Tem., °C</b>	130 – 170	150 – 170	140 – 170	130 – 160	145 – 180	155 - 185
<b>Temp. n. Fertiger, °C</b>	145 – 175	140 – 170	150 – 165	150 – 170	145 – 180	150 - 170
<b>Walzvorgänge (vorne, hinten)</b>	10t:10-13x, mit 1-2x oszillieren, 1x vibrieren; 8t: 7x sta- tisch	10t: zunächst 2x normal, dann 2x vibrieren, dann so oft wie möglich; 7x statisch	5-7x 5t mit ½ Vibration 10t statisch	8t: 4-5x mit Vibration 10t: 4-5x mit ½ Vibration 14t statisch	11t: 10-12x 13t statisch	9t: 10-15x, 2-3x vibrie- ren, 2-3x oszillie- ren; 9t+11t sta- tisch
<b>Anzahl Einbauten</b>	1. Einbau		2. Einbau	5 SDA		>6 SDA
<b>Aussagen über / Be- sonderheiten beim Einbau</b>	keine; Walz- Fahrer fragte nach dem Belagstyp (!)	Gefahr von zu viel Vibra- tionen nur bei Luft- temperaturen über 30°C; hintere Wal- zen für letzte 1-2% Ver- dichtung; Walzen vorn bis 100m, fern bis 300m hinter Fertiger	wie MR8; Polier achtet gut auf Ein- bau	Verarbeitung schwierig, empfindlich auf Umge- bungstemp- eratur, An- passung Walzenspiel nach Troxler	Arbeitsbe- reich der dynam. und stat. Walzen überlappen stark: Nahwalzen bis 100m, Fernwalze bis 10-30m hinter Ferti- ger; zweimaliger Stillstand	Fahrer ach- ten genau darauf, wo sie fahren; Nahwalzen bis 50m hinter Ferti- ger, statische Fernwalze 5 - 7x, 50-125m

Die Temperaturwerte des Asphalts in den Tabellen stellen jeweils die Spannweiten dar, die anhand von sporadisch aufgenommenen Infrarotbildern und bei den Probenahmen bestimmt wurden, eine kontinuierliche Überwachung der Temperaturen erfolgte nicht. Entlang des Fertigerbalkens, also quer zur Einbaurichtung, variieren die Strassentemperaturen üblicherweise um 10 bis 15 °C. Da die Einbautemperatur ein sehr wichtiger Parameter ist, wurde exemplarisch in Schöffland ihr örtlicher Verlauf als Funktion der Entfernung vom Fertiger gemessen (*Abb. 6*, links) und es wurde die Oberflächentemperatur als Funktion der Anzahl der Walzvorgänge bestimmt (*Abb. 6*, rechts). Die Temperatur an der Oberfläche des gerade eingebauten Fahrbahnbelags nimmt in etwa exponentiell mit der Entfernung vom Fertigerbalken ab und ist natürlich auch von den Wetterbedingungen (Lufttemperatur, Wind, Sonneneinstrahlung) abhängig. Aufgrund des guten Wärmespeichervermögens des Asphalts dürfte die entsprechende Kurve innerhalb der neuen Deckschichten langsamer abfallen. Trotzdem ist klar, dass die mechanische Verdichtungswirkung des Walzens vor allem einige zehn Meter hinter dem Fertiger erfolgt, wo es noch heiss genug ist. Gleichzeitig nimmt die Anzahl der Überrollungen mit zunehmender Oberflächentemperatur aber sehr schnell ab, weil einerseits auf einem gegebenen Strassenabschnitt nur kurze Zeit eine sehr hohe Temperatur herrscht und andererseits die Walzen

beim Hin- und Herfahren meist einige zehn Meter zurücklegen, bevor sie die Fahrtrichtung umkehren und sich somit im heissesten Bereich nur selten aufhalten.



**Abb. 6** Oberflächentemperaturabfall mit der Entfernung vom Fertiger (links) und Oberflächentemperatur als Funktion der Anzahl der Walzvorgänge (rechts) beim Einbau des SDA 8 in Schöffland.

## 2.4 Durchführung der CPX- und in situ Messungen

Jeweils wenige Tage nach den Einbauten wurden die Strassen für den Verkehr freigegeben. Nach einer vier- bis sechswöchigen Befahrung können die Beläge als eingefahren betrachtet werden. Nach dieser Mindestfrist erfolgte zunächst eine CPX-Messung beider Fahrstreifen mit der normgerechten Fahrgeschwindigkeit von 50 km/h und den beiden obligatorischen Messreifen P1 und H1 [8]. Die CPX-Messungen wurden zeitnah ausgewertet, um die Homogenität des Einbaus zu beurteilen und geeignete in situ Messstellen zu identifizieren. Bevorzugt wurden in situ Messpunkte nahe bei den Mischgutentnahmestellen. Die Tabellen *Tab. 9* und *Tab. 10* listen Zeitpunkte und Umgebungsbedingungen der akustischen Messungen auf.

**Tab. 9** Durchführung und Temperaturen bei CPX und in situ Messungen auf SDA 4.

Ort	Dottikon	Niederlenz	Rudolfstetten	Küttigen	Baden	Eggenwil
<b>CPX</b>						
Messdatum	25.09.15	12.10.15	29.07.16	29.07.16	29.07.16	11.+ 12.10.16
Uhrzeit	13 – 16 Uhr	20 – 22 Uhr	11 – 13 Uhr	9 – 15 Uhr	10 – 14 Uhr	11 – 13 Uhr
Lufttemperatur, °C	17 – 20	9 – 10	27 - 28	23 - 29	24 - 30	11 - 11
Fahrbahntemp., °C	12 – 37	14 – 17	46 - 54	33 - 52	30 - 52	14 - 28
<b>Schallabsorptionsgrad in situ</b>						
Messdatum	19.11.15	18.11.15	15.08.16	15.08.16	15.08.16	02.11.16
Uhrzeit	12 – 16 Uhr	15 – 17 Uhr	15 – 17 Uhr	17 – 18 Uhr	13 – 14 Uhr	11 – 17 Uhr
Lufttemperatur, °C	17 – 18	17 – 19	29 - 30	28 - 29	25 - 30	12 - 16
<b>Strömungswiderstand in situ</b>						
Messdatum	19.11.15	18.11.15	15.08.16	08.08.16	15.08.16	13.10.16
Uhrzeit	12 – 16 Uhr	15 – 17 Uhr	15 – 17 Uhr	12 – 14 Uhr	13 – 14 Uhr	11 – 13 Uhr
Lufttemperatur, °C	17 – 18	17 – 19	29 - 30	23 - 26	25 - 30	10 - 12
<b>Oberflächentextur in situ</b>						
Messdatum	03.12.15	03.12.15	08.08.16	08.08.16	08.08.16	13.10.16
Uhrzeit	15 – 16 Uhr	16 – 17 Uhr	17 – 18 Uhr	9 – 13 Uhr	19 – 20 Uhr	11 – 13 Uhr

**Tab. 10** Durchführung und Temperaturen bei CPX und in situ Messungen auf SDA 8.

Ort	Hallwil	Schöffland	Oensingen	Waltenschwil	Aarau	Busslingen
<b>CPX</b>						
Messdatum	25.09.15	12.10.15	25.09.15	12.10.15	29.07.16	01.11.2016
Uhrzeit	10 – 14 Uhr	13 – 18 Uhr	9 – 17 Uhr	15 – 17 Uhr	9 – 15 Uhr	12 – 14 Uhr
Lufttemperatur, °C	14 – 20	10 – 17	12 – 14	11 – 13	23 - 29	11 - 11
Fahrbahntemp., °C	12 – 33	14 – 29	7 – 30	13 – 22	29 - 54	14 - 24
<b>Schallabsorptionsgrad in situ</b>						
Messdatum	18.11.15	19.11.15	01.12.15	19.11.15	15.08.16	02.11.2016
Uhrzeit	11 – 14 Uhr	16 – 18 Uhr	13 – 15 Uhr	10 – 12 Uhr	11 – 12 Uhr	14 – 15 Uhr
Lufttemperatur, °C	16 – 17	15 – 16	12 – 15	13 – 16	24 - 25	13 - 14
<b>Strömungswiderstand in situ</b>						
Messdatum	18.11.15	19.11.15	01.12.15	19.11.15	09.08.16	02.11.2016
Uhrzeit	11 – 14 Uhr	16 – 18 Uhr	13 – 15 Uhr	10 – 12 Uhr	17 – 18 Uhr	12 – 13 Uhr
Lufttemperatur, °C	16 – 17	15 – 16	12 – 15	13 – 16	20 - 20	15 - 16
<b>Oberflächentextur in situ</b>						
Messdatum	03.12.15	03.12.16	03.12.15	03.12.15	08.08.16	02.11.16
Uhrzeit	13 – 14 Uhr	11 – 12 Uhr	10 – 11 Uhr	14 – 15 Uhr	14 – 16 Uhr	12 – 13 Uhr

## 2.5 CPX-Messergebnisse

In Tab. 11 sind die CPX-Ergebnisse aller Strecken in beiden Fahrtrichtungen und mit beiden Messreifentypen zusammen mit den jeweiligen Standardabweichungen aufgelistet. Ebenfalls eingetragen sind die  $K_b$ -Werte nach der Umrechnungsformel für 50 km/h wie im Anhang 1c vorgegeben [1].

**Tab. 11**  $CPX_P$ - und  $CPX_H$ -Werte mit Standardabweichungen  $\sigma$  sowie  $K_b$ -Werte in dB(A).

Ort	Belag	Richtung	$CPX_P \pm \sigma$	$K_{bPW,50km/h}$	$CPX_H \pm \sigma$	$K_{bLW,50km/h}$
Dottikon	4	Nord	$85.6 \pm 0.5$	-5.6	$87.7 \pm 0.5$	-6.8
		Süd	$86.2 \pm 0.6$	-4.9	$88.0 \pm 0.5$	-6.4
Niederlenz	4	Nord	$86.0 \pm 0.6$	-5.1	$88.2 \pm 0.6$	-6.1
		Süd	$86.3 \pm 0.7$	-4.8	$88.3 \pm 0.6$	-5.9
Rudolfstetten	4	West	$85.6 \pm 0.4$	-5.6	$86.8 \pm 0.8$	-7.9
		Ost	$85.2 \pm 0.3$	-6.2	$86.6 \pm 0.6$	-8.3
Küttigen	4	West	$85.3 \pm 0.4$	-5.9	$86.1 \pm 0.5$	-8.9
		Ost	$85.4 \pm 0.4$	-5.8	$86.8 \pm 0.6$	-8.0
Baden	4	West	$86.5 \pm 0.6$	-4.5	$88.1 \pm 0.5$	-6.2
		Ost	$86.6 \pm 0.6$	-4.4	$87.8 \pm 0.6$	-6.6
Eggenwil	4	Nord	$87.8 \pm 1.2$	-2.9	$88.2 \pm 0.7$	-6.0
		Süd	$87.9 \pm 0.6$	-2.7	$88.7 \pm 0.7$	-5.4
<b>Mittelwert</b>	<b>4</b>		<b><math>86.2 \pm 0.6</math></b>	<b>-4.9</b>	<b><math>87.7 \pm 0.6</math></b>	<b>-6.9</b>
Hallwil	8	West	$88.0 \pm 0.5$	-2.6	$88.2 \pm 0.6$	-6.1
		Ost	$87.9 \pm 0.6$	-2.8	$88.2 \pm 0.4$	-6.1
Schöffland	8	Nord	$87.3 \pm 0.3$	-3.5	$88.6 \pm 0.3$	-5.6
		Süd	$87.6 \pm 0.3$	-3.2	$88.4 \pm 0.3$	-5.8
Oensingen	8	West	$89.2 \pm 0.4$	-1.1	$89.3 \pm 0.3$	-4.6
		Ost	$89.7 \pm 0.9$	-0.6	$90.1 \pm 1.0$	-3.5
Waltenschwil	8	West	$87.4 \pm 0.7$	-3.4	$89.1 \pm 0.8$	-4.9
		Ost	$88.7 \pm 0.6$	-1.8	$89.7 \pm 0.6$	-4.0
Aarau	8	West	$87.0 \pm 0.8$	-3.8	$87.7 \pm 1.8$	-6.7
		Ost	$86.9 \pm 0.6$	-4.1	$87.2 \pm 0.9$	-7.4
Busslingen	8	Nord	$87.9 \pm 0.6$	-2.8	$88.6 \pm 0.5$	-5.6
		Süd	$88.9 \pm 0.6$	-1.5	$89.6 \pm 0.6$	-4.1
<b>Mittelwert</b>	<b>8</b>		<b><math>88.1 \pm 0.5</math></b>	<b>-2.6</b>	<b><math>88.8 \pm 0.6</math></b>	<b>-5.4</b>

Die CPX-Pegel zeigen signifikante Unterschiede zwischen den beiden Belagstypen. Der SDA 4 führt zu tieferen Schalldruckpegeln von  $CPX_P = 86.2$  dB(A) und  $CPX_H = 87.7$  dB(A), während der SDA 8 lauter ist mit  $CPX_P = 88.1$  dB(A) und  $CPX_H = 88.8$  dB(A). Die Spannweite vom leisesten zum lautesten Fahrstreifen beträgt beim P-Reifen für beide Beläge 2.7 dB(A). Für den H-Reifen auf SDA 8 liegt diese Spanne bei 2.9 dB(A) und auf dem SDA 4 bei nur 1.6 dB(A). Die aus den CPX-Pegeln abgeleiteten  $Kb$ -Werte betragen durchschnittlich auf dem SDA 8  $Kb_{PW,50\text{ km/h}} = -2.6$  dB(A) und  $Kb_{LW,50\text{ km/h}} = -5.4$  dB(A), entsprechend auf dem SDA 4  $Kb_{PW,50\text{ km/h}} = -4.9$  dB(A) und  $Kb_{LW,50\text{ km/h}} = -6.9$  dB(A). Die Spannweite der  $Kb$ -Werte liegt jeweils bei 3.5 dB(A) oder knapp darunter. Die Spannweiten bei den  $Kb$ -Werten sind grösser, weil bei ihrer Berechnung aus CPX-Pegelwerten mit empirischen Konstanten grösser eins multipliziert wird [1]:

$$Kb_{50\text{km/h},PW} = 1.2468 CPX_P - 112.30$$

$$Kb_{50\text{km/h},LW} = 1.3617 CPX_H - 126.16$$

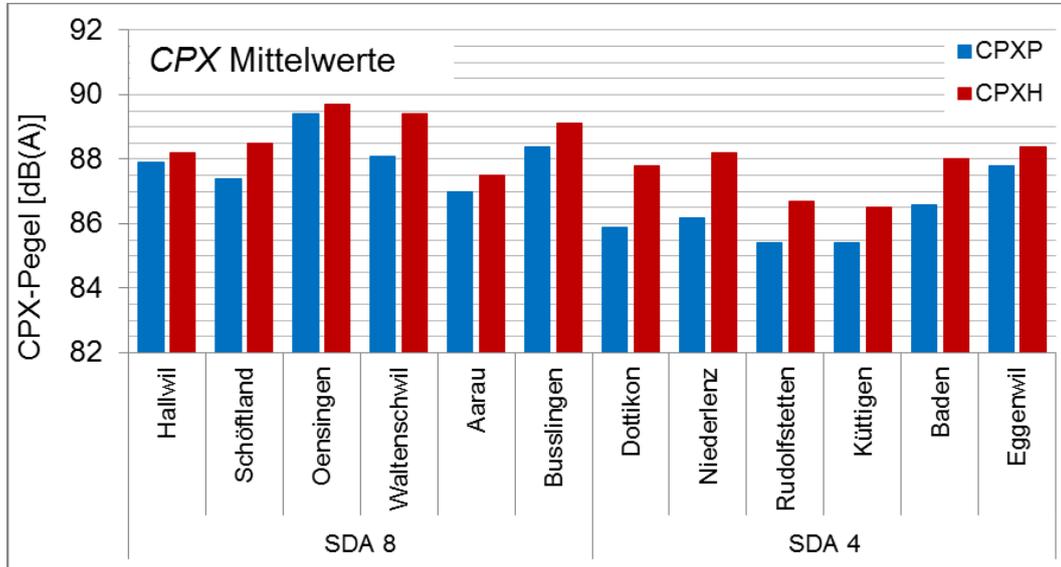
Der leiseste SDA 8 Einbau liegt in Aarau, der lauteste in Oensingen. Am homogensten ist der SDA 8 in Schöffland. Besonders leise SDA 4 Beläge wurden in Küttigen und Rudolfstetten eingebaut, der Einbau in Eggenwil weist die schlechteste akustische Performanz unter den SDA 4 Einbauten auf. Aufgrund des kleineren Grösstkorns ist die Textur des SDA 4 weniger rau und führt deshalb zu schwächerer Anregung von Reifenschwingungen, insbesondere des texturempfindlichen P-Reifens. Der H-Reifen ist auf dem SDA 4 leiser, weil der Schallabsorptionsgrad wegen des höheren Hohlraumgehalts höhere Werte aufweist als beim SDA 8. Die durchschnittliche Standardabweichung der CPX-Pegel entlang der Strecken liegt um 0.6 dB(A) für alle Beläge. Besonders laute Fahrstreifen wie in Oensingen, Fahrtrichtung Ost, und in Eggenwil, Fahrtrichtung Nord, sind tendenziell auch besonders inhomogen.

Das Diagramm in *Abb. 7* gibt eine grafische Übersicht über die auf den zwölf Einbauten gemessenen CPX-Pegel und *Abb. 8* über die daraus nach [1] berechneten  $Kb$ -Werte. Deutlich ist der akustische Vorteil der SDA 4 Beläge (rechts) gegenüber den SDA 8 Deckschichten (links) zu erkennen (siehe auch Mittelwerte in *Tab. 11*), insbesondere für den P-Reifen (blau), aber auch für den H-Reifen (rot). Gut erkennbar sind auch die Schwankungsbreiten, so liegt der SDA 4 von Eggenwil akustisch auf ähnlichem Niveau wie die SDA 8 Einbauten in Hallwil oder Schöffland und liegt um 2 bis 3 dB(A) über den Pegeln von Küttigen und Rudolfstetten.

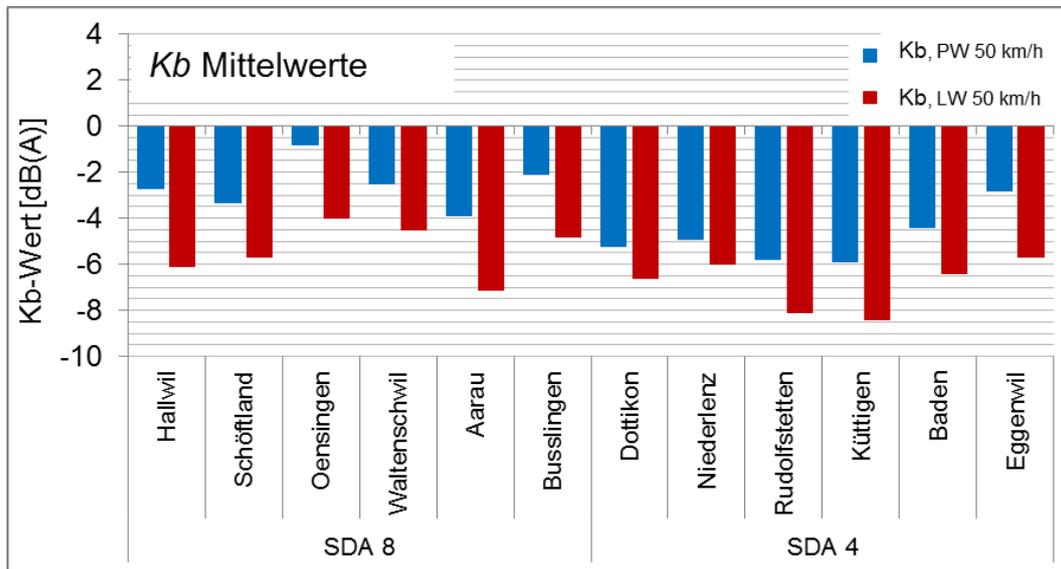
In *Abb. 9* bis *Abb. 12* sind die 20 m-Pegel-Ort-Verläufe für alle Fahrstreifen und beide Belagsarten zusammengestellt. Danach ist der H-Reifen fast durchgehend lauter als der P-Reifen. Entlang der Strecken weisen beide Reifen oftmals am gleichen Ort lokale Pegelmaxima oder -minima auf, d.h. dort treten jeweils jeweils Belagsinhomogenitäten in Erscheinung, auf welche beide Reifen empfindlich sind. Meist dürfte es sich um besonders feinraue (Minima) oder besonders raue (Maxima) Texturabschnitte handeln. Teilweise verlaufen die Pegelkurven weitgehend parallel zueinander (z.B. in Dottikon), was auf homogene Belagsabschnitte hindeutet. Unterbrechungen der Messkurven gehen auf das Überfahren von Zebrastreifen, Kanaldeckeln usw. zurück, die vor der Belagsanalyse ausgeblendet wurden.

In *Abb. 13* bis *Abb. 16* sind für beide Belagsarten die mittleren Terzspektren für alle Fahrstreifen zusammengestellt. Bei Frequenzen unterhalb von gut 1'000 Hz sind die Spektren geprägt von der mechanischen Anregung aufgrund der Oberflächenrauheit. Der SDA 8 verursacht dabei eher gleichmässig symmetrische Formen der Spektren für beide Reifen. P- und H-Reifen zeigen auf den SDA 4 Belägen dagegen deutliche spektrale Überhöhungen zwischen 500 und 630 Hz sowie dem Doppelten dieser Frequenzen zwischen 1'000 und 1'250 Hz. Dies ist eine für feinraue Beläge typische Auswirkung der Schwingungsanregung des Reifens durch den Eingriff der Profilklotze. Die Anzahl der Profilklotze über den Reifenumfang bestimmt in Verbindung mit der Rollgeschwindigkeit die sogenannte Stolleneingriffsfrequenz und deren Vielfache, die sich dann in den akustischen Spektren bemerkbar machen. Da die Profilklotze des H-Reifens entlang des Reifenumfangs und in Querrichtung wesentlich gleichmässiger angeordnet sind als dies beim P-Reifen mit seinem hinsichtlich Klotzlänge und Klotzabstand randomisierten Profil

der Fall ist, macht sich die Stolleneingriffsfrequenz beim H-Reifen im Rollgeräuschspektrum deutlicher bemerkbar als beim P-Reifen. Durch die grössere Rauigkeit der SDA 8 Beläge sind die einzelnen Profilklötze weniger vollflächig mit der Fahrbahnoberfläche in Kontakt, was zu einer zusätzlichen Randomisierung des Kontaktes zwischen Reifen und Fahrbahn, zu einer zufälligeren Verteilung der Kontaktpunkte führt. Aus diesem Grund ist das Spektrum in den meisten Fällen der SDA 8 Beläge ausgeglichener als bei den SDA 4 Belägen.



**Abb. 7** Arithmetischer Mittelwert der CPX-Pegel beider Fahrstreifen für die Reifentypen P (blau) und H (rot) für den SDA 8 (links) und SDA 4 (rechts).

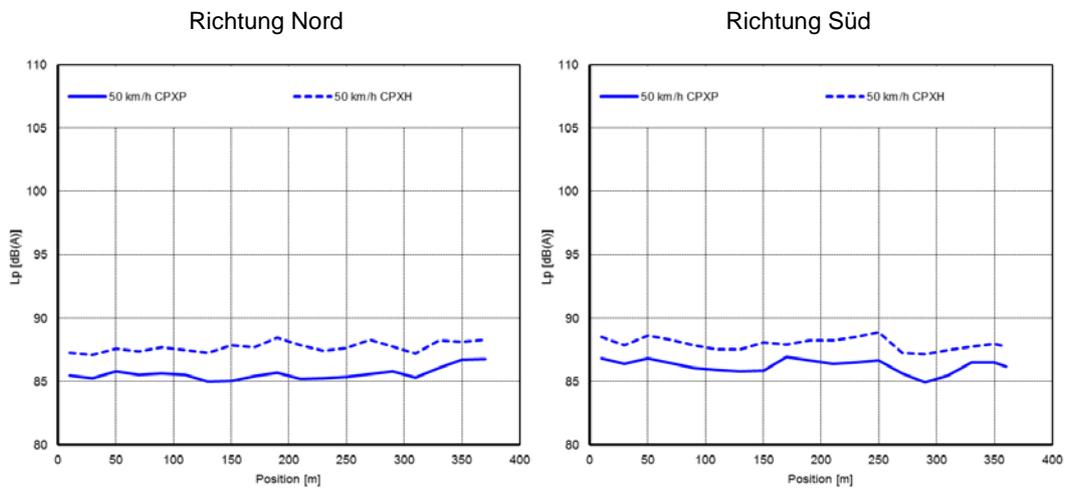


**Abb. 8** Arithmetischer Mittelwert der Kb-Werte beider Fahrstreifen für die Reifentypen P (blau) und H (rot) für den SDA 8 (links) und SDA 4 (rechts).

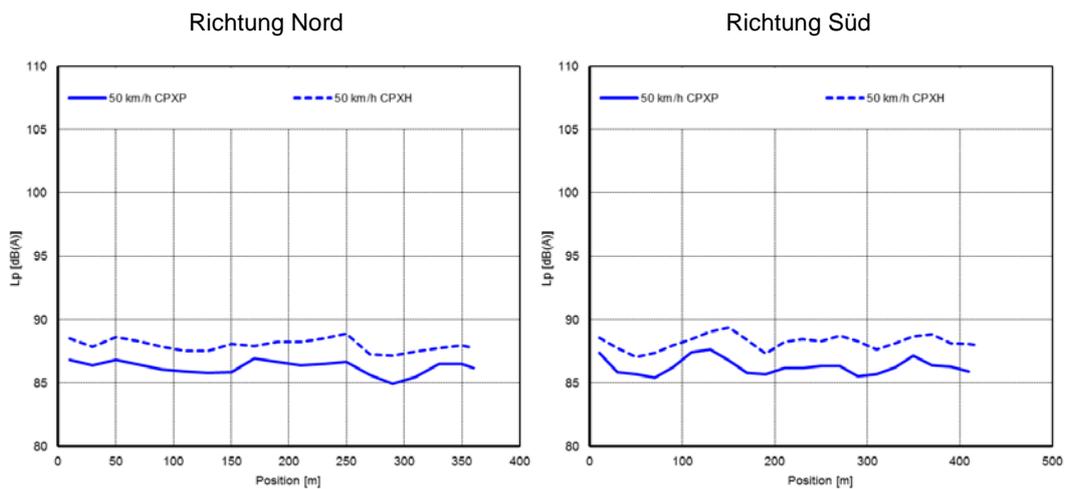
Der SDA 4 verursacht Spektren, die zu höheren Frequenzen oberhalb von 2'000 Hz steiler abfallen. Eine Folge des im Vergleich zum SDA 8 höheren Strömungswiderstands im Reifen-Fahrbahn-Kontakt, der zu geringeren aerodynamischen Geräuschen führt, die sich besonders im hohen Frequenzbereich bemerkbar machen. Eine Ausnahme bilden die Spektren in Rudolfstetten und mit Abstrichen in Küttigen, die von einem Maximum bei 630 Hz fast linear zu höheren Frequenzen hin abfallen. Hierin schlägt sich die hohe

Schallabsorption der Beläge nieder, die zur Rollgeräuschminderung bei höheren Frequenzen beiträgt.

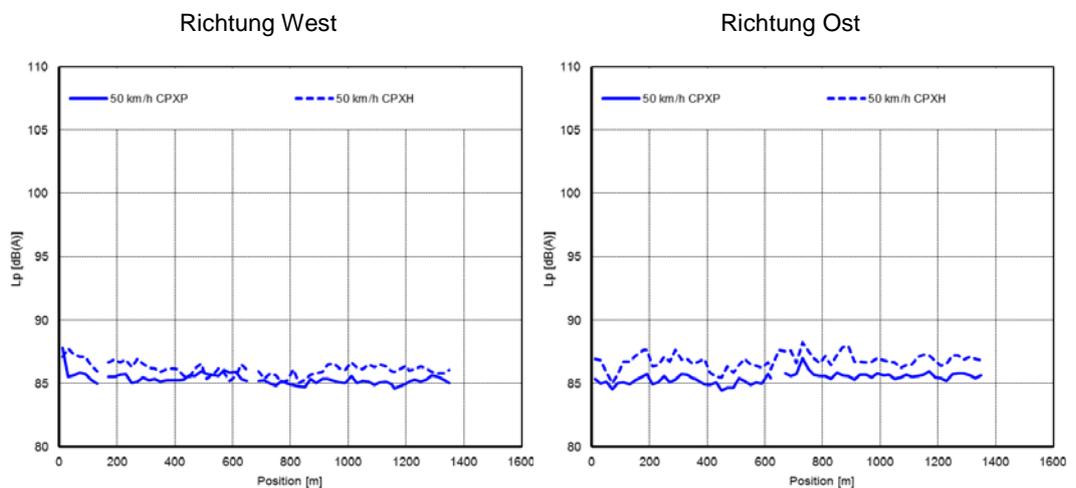
#### SDA 4 Dottikon



#### SDA 4 Niederlenz

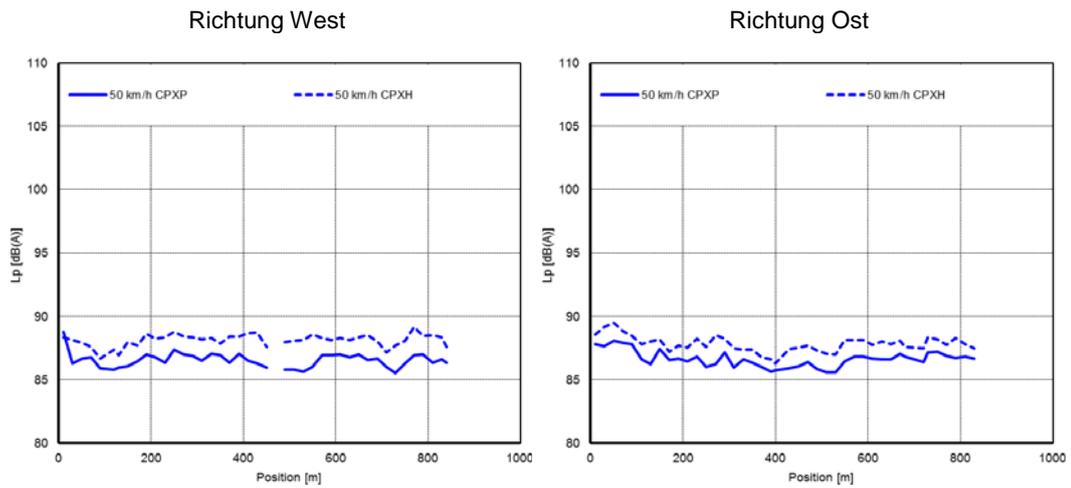


#### SDA 4 Küttigen

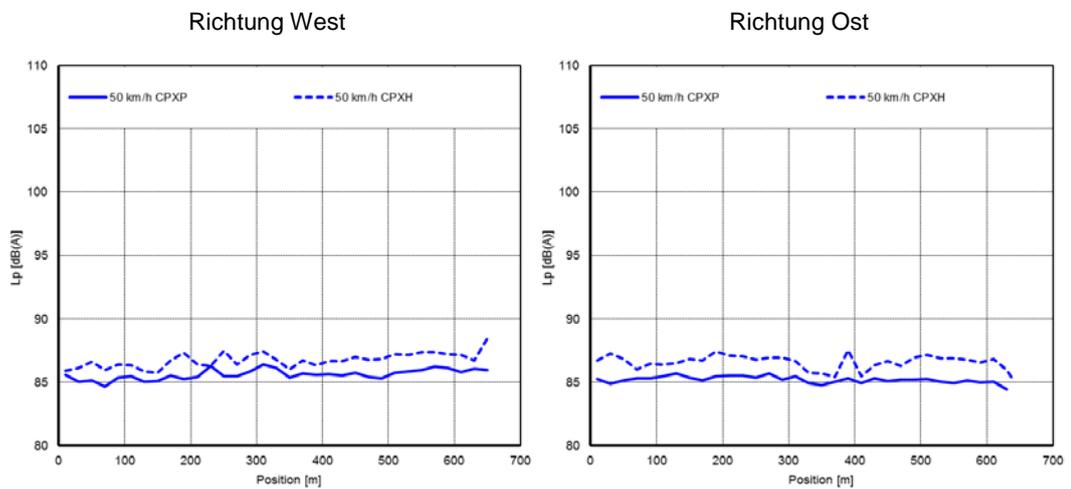


**Abb. 9** CPX-Pegel-Ort-Verlauf für die Reifentypen P und H für die SDA 4 in Dottikon, Niederlenz und Küttigen.

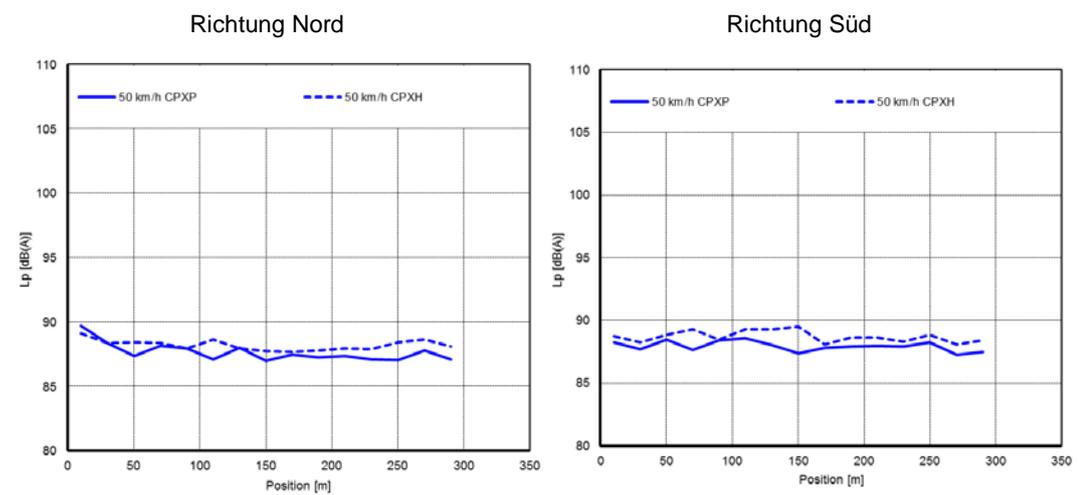
#### SDA 4 Baden



#### SDA 4 Rudolfstetten

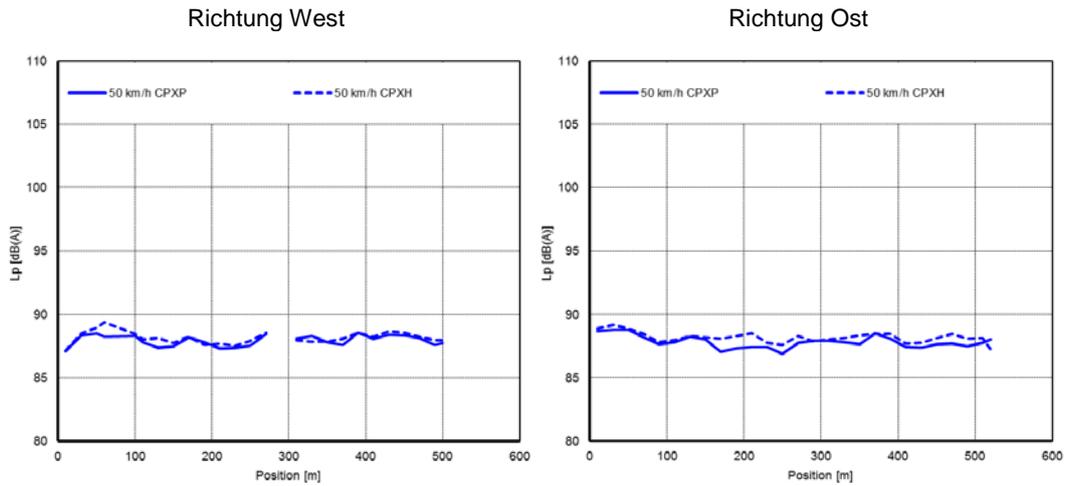


#### SDA 4 Eggenwil

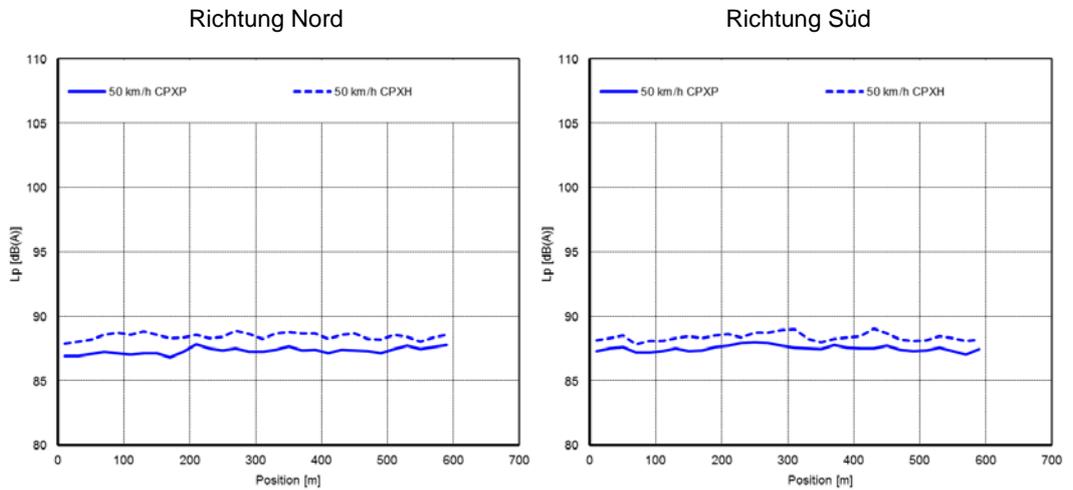


**Abb. 10** CPX-Pegel-Ort-Verlauf für Reifentypen die P und H für die SDA 4 in Baden, Rudolfstetten und Eggenwil.

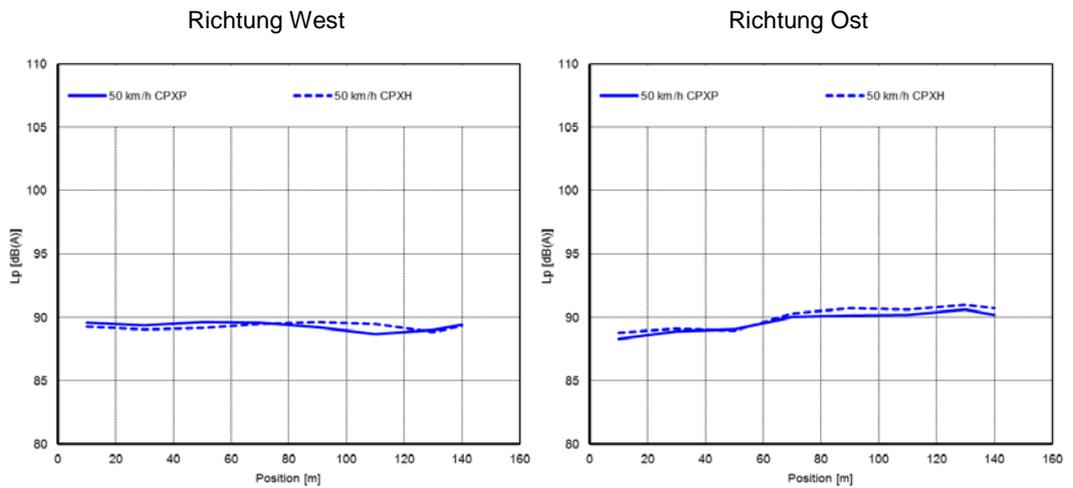
**SDA 8 Hallwil**



**SDA 8 Schöffland**

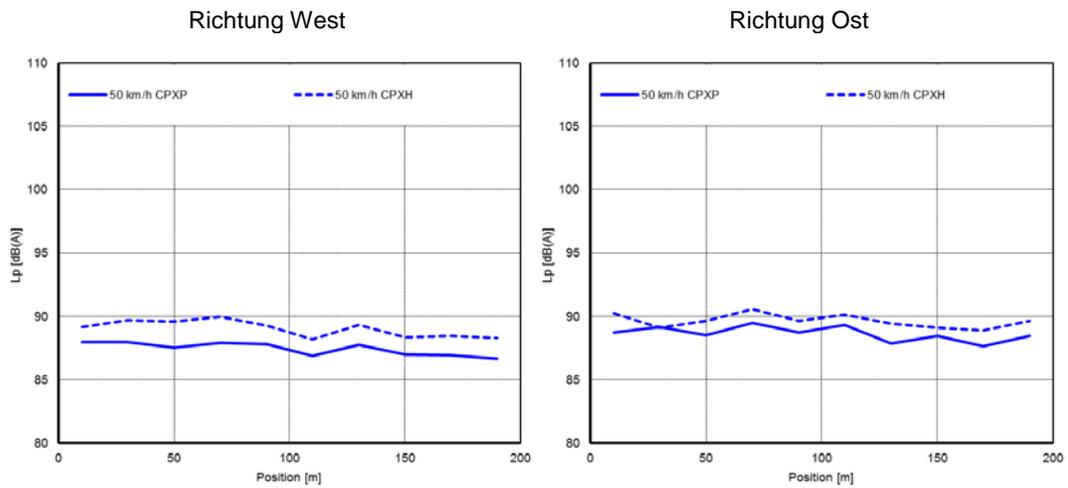


**SDA 8 Oensingen**

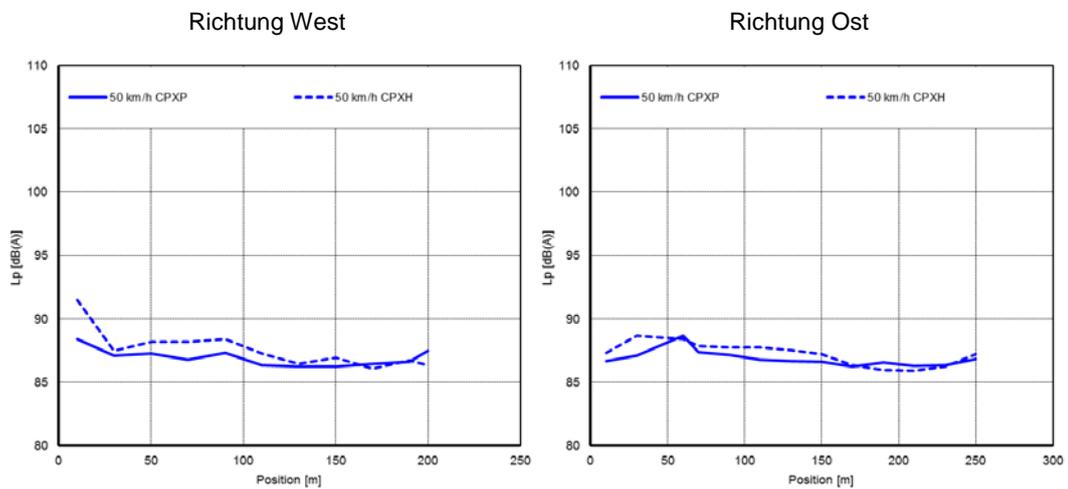


**Abb. 11** CPX-Pegel-Ort-Verlauf für die Reifentypen P und H für die SDA 8 in Hallwil, Schöffland und Oensingen.

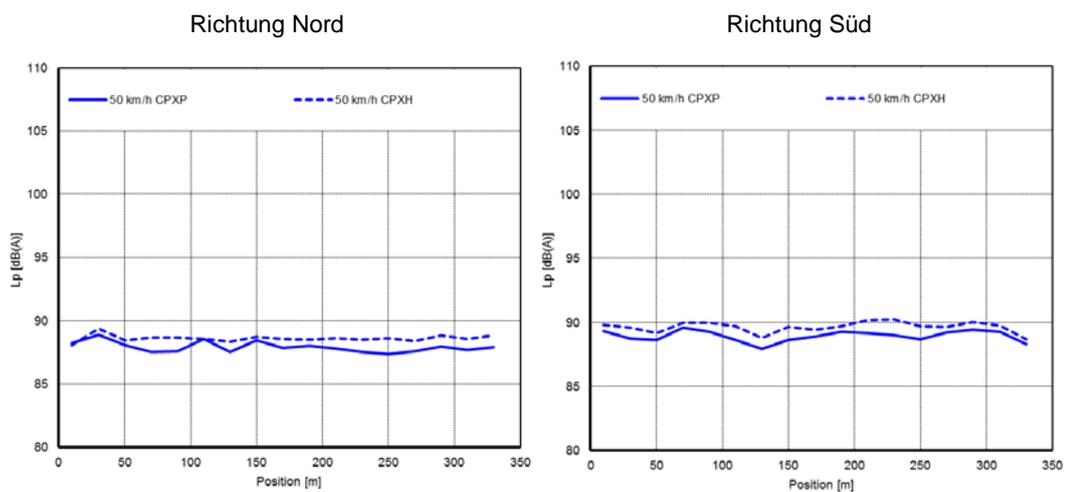
### SDA 8 Waltenschwil



### SDA 8 Aarau

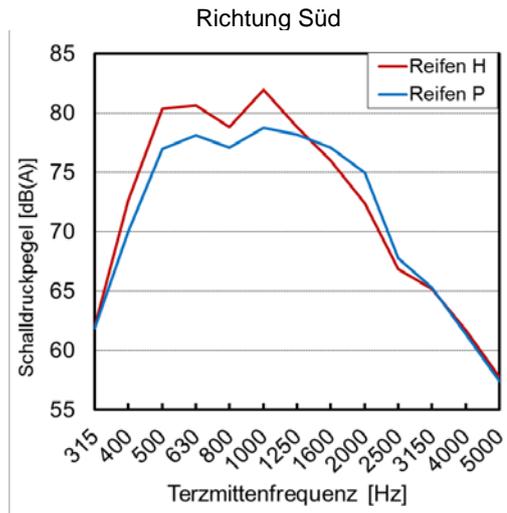
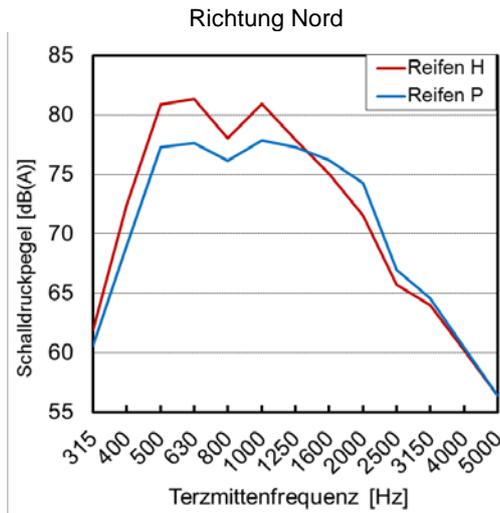


### SDA 8 Busslingen

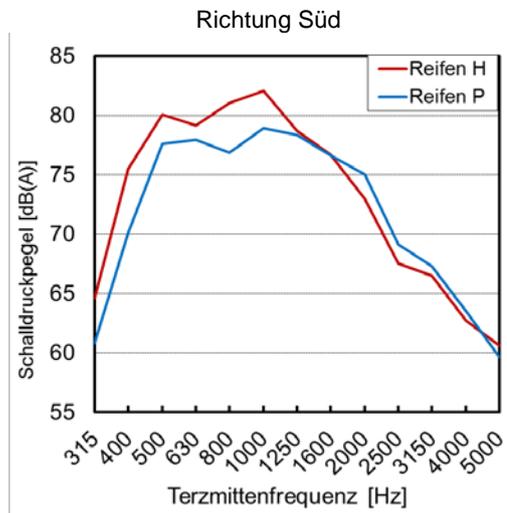
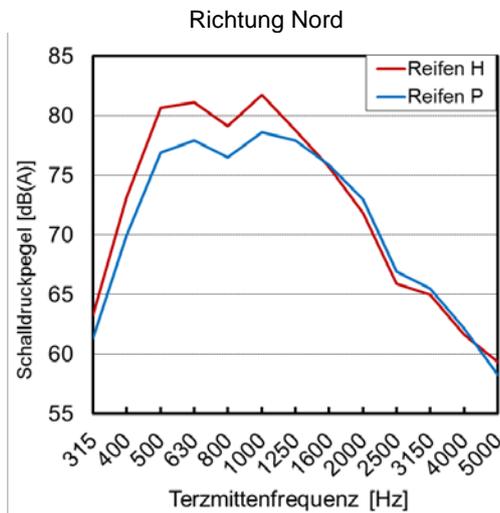


**Abb. 12** CPX-Pegel-Ort-Verlauf für die Reifentypen P und H für die SDA 8 in Waltenschwil, Aarau und Busslingen.

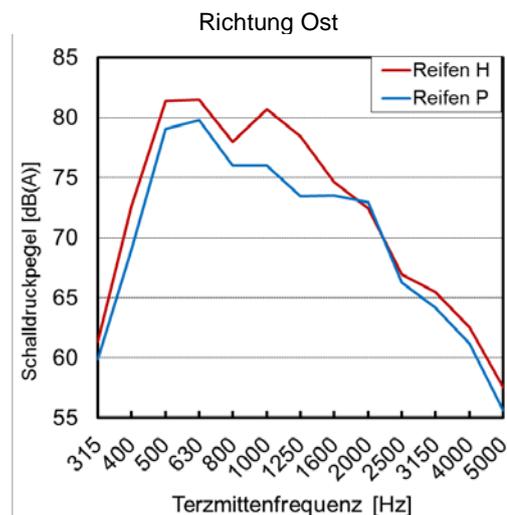
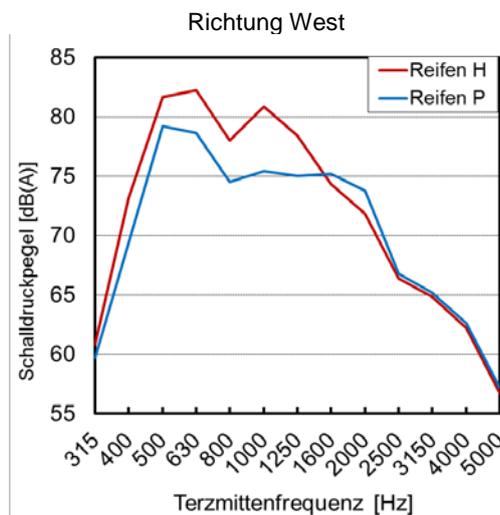
**SDA 4 Dottikon**



**SDA 4 Niederlenz**

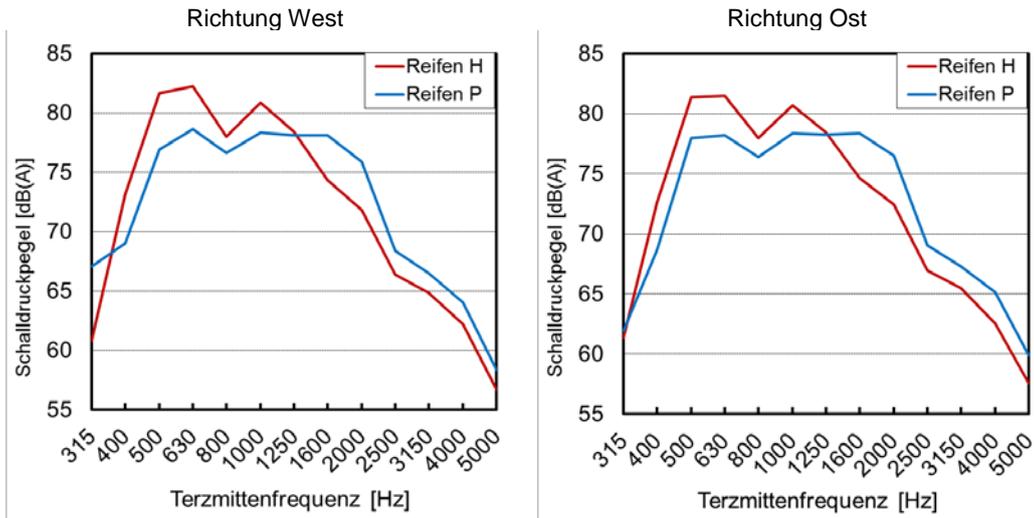


**SDA 4 Küttigen**

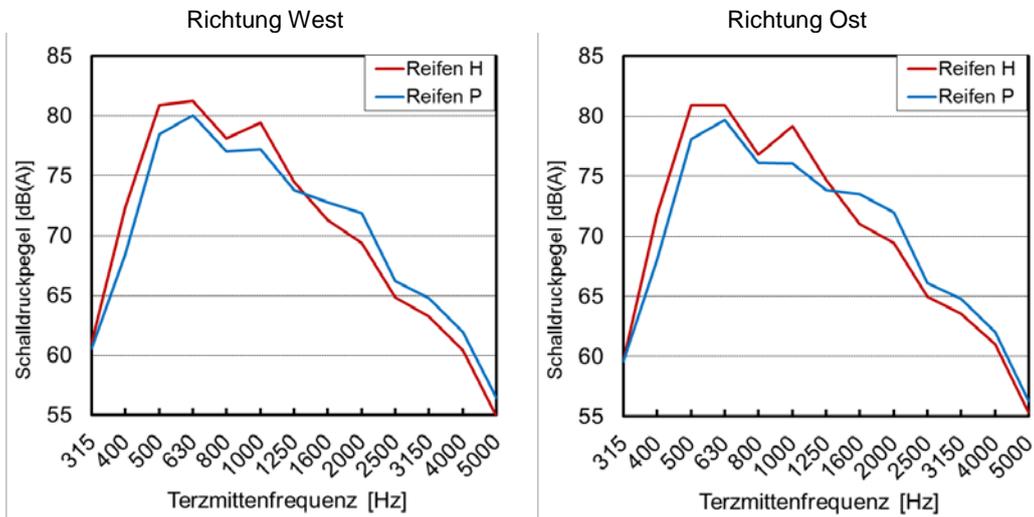


**Abb. 13** Mittlere Terzspektren über die gesamte Länge der Fahrbahn und alle Fahrstreifen für die Reifentypen P und H für die SDA 4 in Dottikon, Niederlenz und Küttigen.

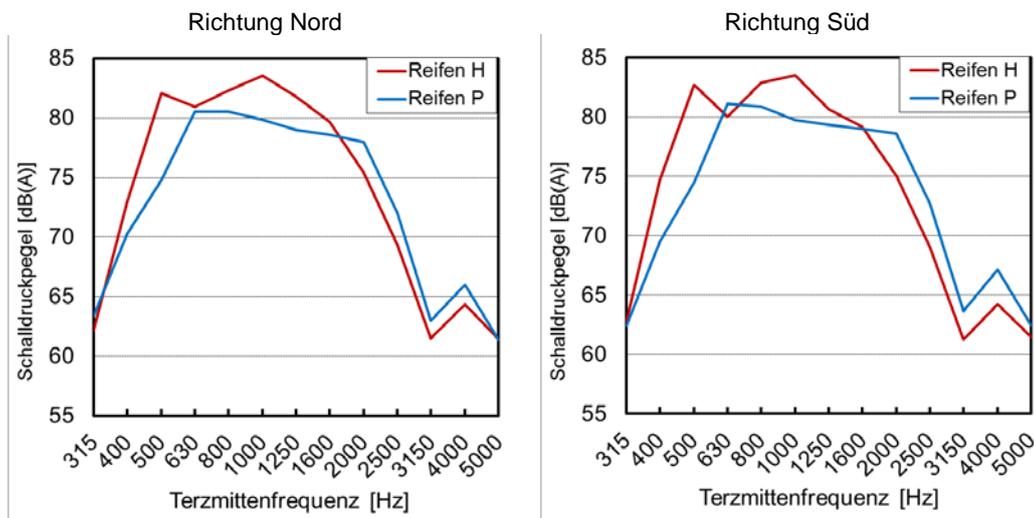
**SDA 4 Baden**



**SDA 4 Rudolfstetten**

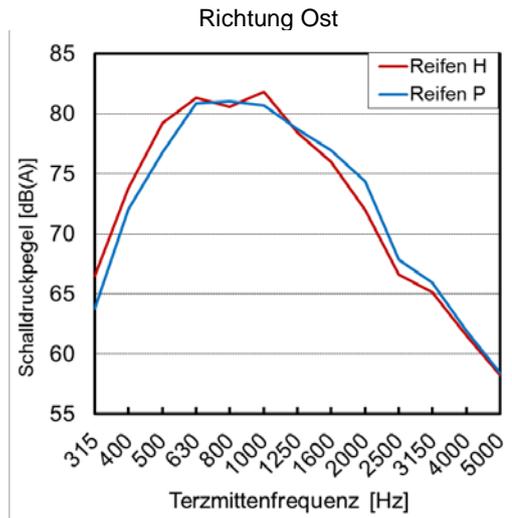
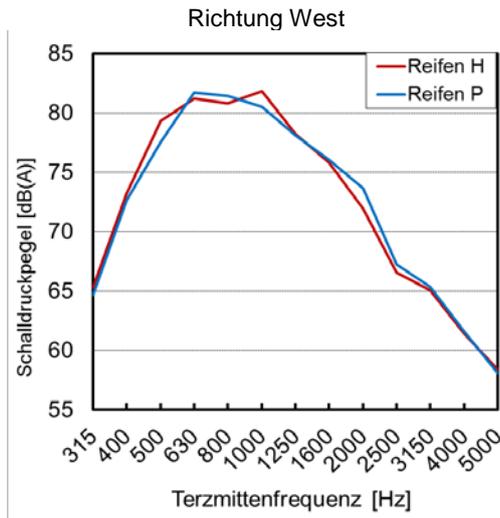


**SDA 4 Eggenwil**

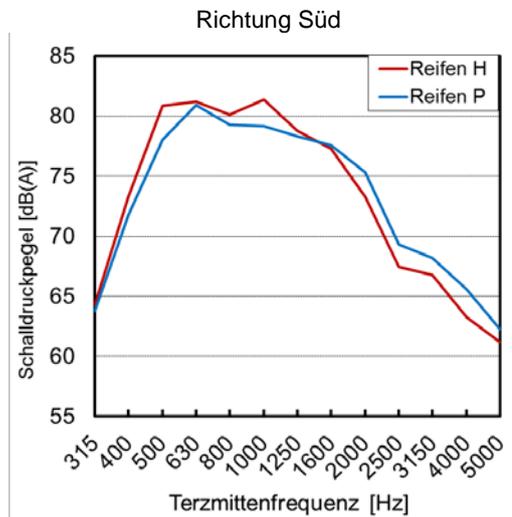
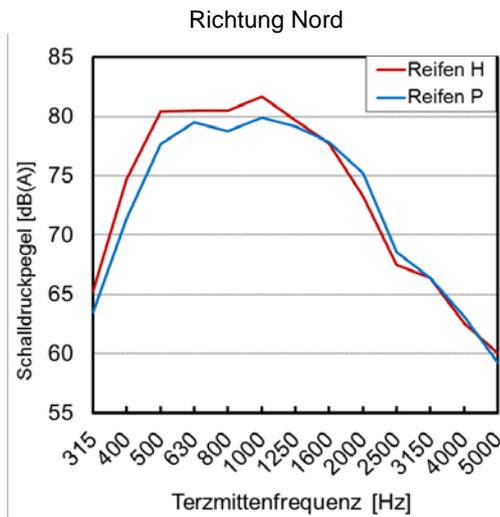


**Abb. 14** Mittlere Terzspektren über die gesamte Länge der Fahrbahn und alle Fahrstreifen für die Reifentypen P und H für die SDA 4 in Baden, Rudolfstetten und Eggenwil.

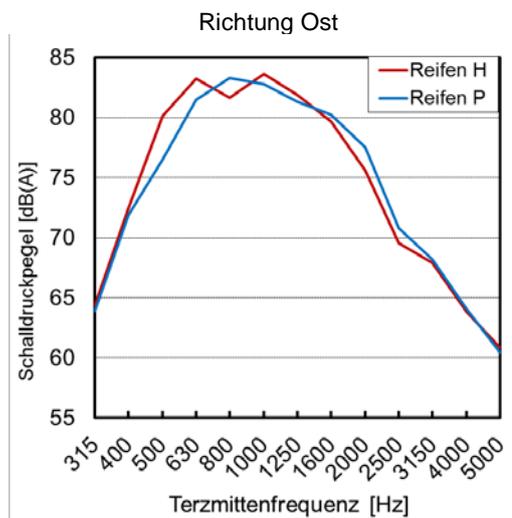
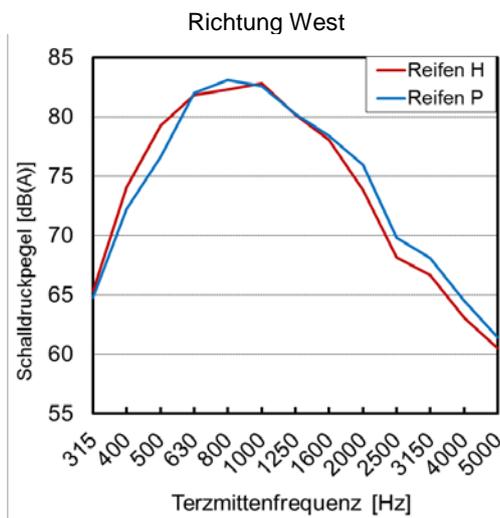
**SDA 8 Hallwil**



**SDA 8 Schöffland**

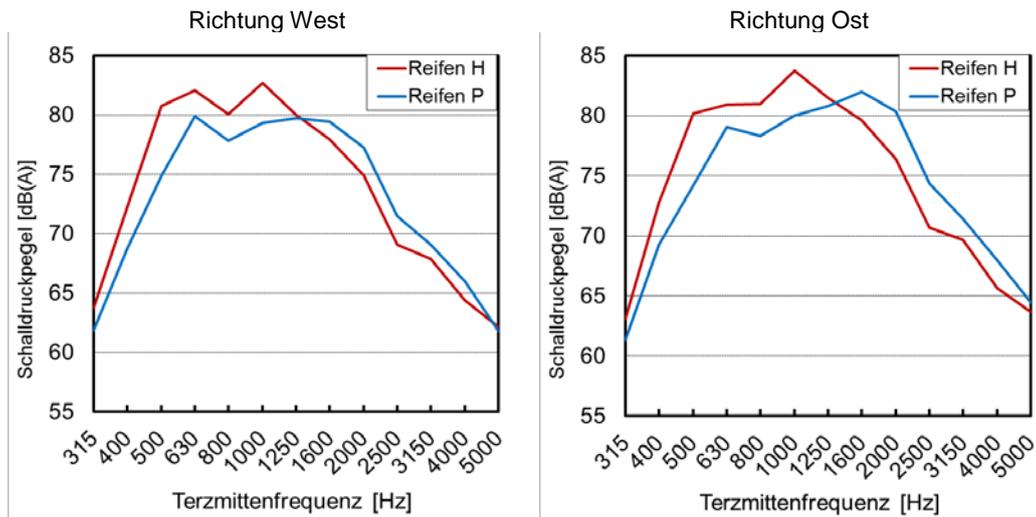


**SDA 8 Oensingen**

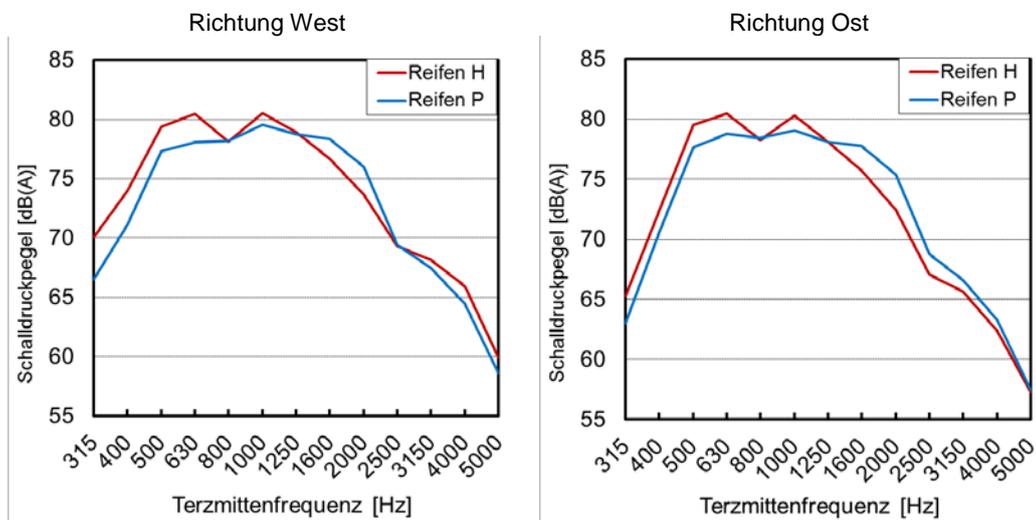


**Abb. 15** Mittlere Terzspektren über die gesamte Länge der Fahrbahn und alle Fahrstreifen für die Reifentypen P und H für die SDA 8 in Hallwil, Schöffland und Oensingen.

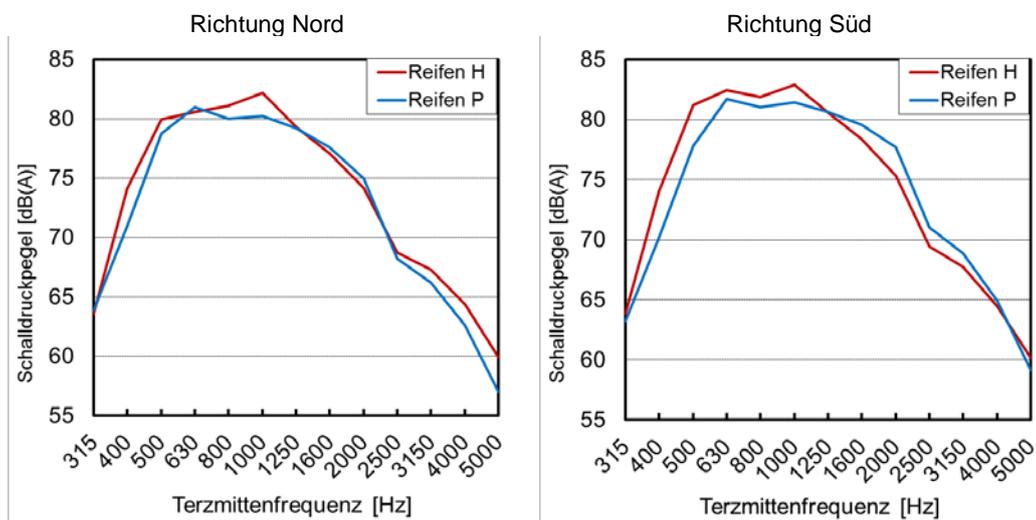
**SDA 8 Waltenschwil**



**SDA 8 Aarau**



**SDA 8 Busslingen**



**Abb. 16** Mittlere Terzspektren über die gesamte Länge der Fahrbahn und alle Fahrstreifen für die Reifentypen P und H für die SDA 8 in Waltenschwil, Aarau und Busslingen.

Bemerkenswert ist allgemein, wie ähnlich jeweils die Spektren für beide Fahrstreifen sind. Dies spricht für die gleichmässige Arbeit der Einbauteams, obwohl fahrstreifenweise verschiedene Fertiger im Einsatz waren.

## 2.6 Messergebnisse in situ

Die Ergebnisse der in situ Messungen sind einerseits in Einzahlwerten, andererseits in Form von Frequenz- und Wellenlängenspektren angegeben. Die Einzahlwerte für alle Messpunkte finden sich in *Tab. 12* für SDA 4 und in *Tab. 13* für SDA 8.

Zur Charakterisierung des Schallabsorptionsgradspektrums wird das arithmetische Mittel  $\bar{\alpha}$  und das Maximum  $\alpha_{\max}$  (aller Terzen von 250 Hz bis 3'150 Hz) sowie dessen Frequenz  $f_{\max}$  angegeben. Je höher der Schallabsorptionsgrad, desto leiser das Rollgeräusch. Der Luftströmungswiderstand („Ströwi“) wurde in der Regel an jedem Messpunkt zweimal gemessen. In der Tabelle wird daher der arithmetische Mittelwert  $\bar{R}_s^*$  in Pa·s/m angegeben. Ein niedriger Strömungswiderstand ist eher günstig. Zur Charakterisierung der Textur werden folgende Grössen und ihre Standardabweichung  $\sigma$  angegeben:

- MPD mittlere Texturtiefe in mm
- $g$  Gestaltfaktor in %
- $\lambda_{\max}, R_{\text{eff,max}}$  Wellenlänge in mm und Magnitude in  $\mu\text{m}$  des Maximums im Texturspektrum
- RMS Effektivwert des Texturprofils in mm
- ETD geschätzte Texturtiefe in mm

Niedrige Werte für die Oberflächenrauigkeit (MPD,  $R_{\text{eff,max}}$ , RMS und ETD) und hohe Werte für den Gestaltfaktor sind anzustreben. Hohe Standardabweichungen  $\sigma$  deuten auf Heterogenität hin.

Die Schallabsorptionsgradspektren sind in *Abb. 17* und *Abb. 18* abgebildet und zeigen die Fähigkeit Schall zu absorbieren als Funktion der Schallfrequenz. Die vier farblich unterschiedlich gekennzeichneten Schallabsorptionsgradkurven pro Messstrecke rühren von den jeweils vier Messpunkten her, die in den Legenden genauer bezeichnet sind. In einem Band um die Kurven herum wird in gleicher Farbe die Spannweite der mindestens drei Einzelmessungen pro Messpunkt dargestellt. Die Einzelmessungen vor Ort waren jeweils um rund 10 cm gegeneinander verschoben. Ein breites Band zeigt folglich hohe Varianz des Absorptionsgrads auf kleinem Raum an. Bei den SDA 4 Deckschichten ist das Absorptionsvermögen gegenüber dem SDA 8 im Durchschnitt höher. In Rudolfstetten und Küttigen wird der Luftschall besonders gut absorbiert und es treten ausgeprägte Maxima zwischen 800 Hz und 1'250 Hz auf, mit Absorptionsgraden bis zu 0.45. In Dottikon und Niederlenz lässt sich von tiefen zu höheren Frequenzen ein rampenartiger Anstieg auf Werte um 0.3 bis 0.4 bei 2'000 Hz verzeichnen. Die Absorption in Baden und Eggenwil ist eher tief mit Maximalwerten unter 0.2. Bei den SDA 8 Einbauten fallen die Standorte Hallwil und Schöftland durch ein Absorptionsmaximum um 1'000 Hz auf und eine insgesamt hohe Absorption. Im Gegensatz dazu ist die Absorption in Aarau über das ganze Frequenzband hinweg recht niedrig. Bei den anderen Standorten steigt die Absorption von tiefen zu höheren Frequenzen leicht an, bis zu einem Wert von etwa 0.2 bei 3'000 Hz.

Die Texturspektren zeigen die Rauigkeit der Belagsoberfläche als Funktion der Rauigkeitswellenlänge (*Abb. 19* und *Abb. 20*) an den zwölf Messstrecken. Für jede Messstrecke wurde an vier Messpositionen die Messapparatur in der rechten Rollspur parallel zur Fahrtrichtung ausgerichtet und es wurden jeweils fünf eng benachbarte Texturprofile aufgenommen, deren Spektren berechnet und gemittelt wurden. Jedes Texturspektrum in den Teilabbildungen ist dem Messpunkt entlang der Strecke zugeordnet, der in der Legende näher bezeichnet und mit eigener Farbe dargestellt ist. Die SDA 4 Einbauten in Baden, Dottikon und Rudolfstetten sind vergleichsweise weniger rau, die von Niederlenz, Küttigen und Eggenwil sind deutlich rauer und untereinander recht ähnlich. Die Texturspektren in Niederlenz, Küttigen und Eggenwil stellen sich als relativ heterogen dar. Un-

ter den SDA 8 Einbauten ist der in Bussingen am rauesten, die Einbauten in Aarau und Waltenschwil sind sehr feinrau, d.h. sie verfügen über niedrigere Rauigkeitstiefen. Die Unterschiede zwischen den Messpositionen sind bei den Strecken in Bussingen, Aarau und Waltenschwil am grössten, d.h. diese Strecken stellen sich als heterogener dar.

**Tab. 12** Ergebnisse der *in situ* Messungen auf den SDA 4 Deckschichten.

Ort	Messpunkt			Absorption			Ströwi	Textur									
	MP	Position m	Richtung	$\bar{\alpha}$ 1	$f_{\max}$ Hz	$\alpha_{\max}$ 1	$\bar{R}_s$ Pa·s/m	MPD mm	$\sigma_{MPD}$ mm	g %	$\sigma_g$ %	$\lambda_{\max}$ mm	$R_{\text{eff,max}}$ µm	RMS mm	$\sigma_{RMS}$ mm	ETD mm	$\sigma_{ETD}$ mm
Dottikon	2	100	Süd	0.11	3'150	0.23	14'345	0.40	0.06	86.7	7.1	6.3	114	0.32	0.05	0.52	0.05
	3	105	Nord	0.11	3'150	0.27	14'779	0.38	0.06	86.8	4.9	12.5	101	0.32	0.05	0.50	0.05
	4	312	Süd	0.13	2'500	0.38	7'266	0.38	0.06	87.2	5.8	6.3	113	0.32	0.06	0.50	0.05
	5	312	Nord	0.18	2'000	0.36	5'166	0.40	0.06	86.7	5.8	10.0	111	0.34	0.06	0.52	0.05
Niederlenz	1	325	Nord	0.12	2'000	0.25	5'480	0.48	0.08	85.8	5.5	8.0	147	0.44	0.06	0.59	0.07
	2	190	Nord	0.12	2'000	0.20	7'417	0.41	0.06	86.5	5.1	5.0	118	0.37	0.05	0.53	0.05
	3	154	Süd	0.13	2'000	0.25	34'521	0.40	0.06	86.9	4.6	6.3	125	0.37	0.06	0.52	0.05
	4	106	Nord	0.14	2'000	0.27	12'159	0.45	0.07	87.0	4.9	8.0	143	0.42	0.06	0.56	0.05
Rudolfstett.	1	125	West	0.16	1'000	0.48	1'803	0.50	0.07	84.5	6.0	6.3	131	0.41	0.06	0.60	0.06
	2	125	Ost	0.14	1'600	0.26	4'892	0.42	0.05	85.2	6.5	8.0	122	0.36	0.05	0.54	0.04
	3	430	West	0.19	1'000	0.35	2'680	0.49	0.07	85.4	6.0	5.0	133	0.40	0.06	0.59	0.05
	4	430	Ost	0.14	1'000	0.28	3'660	0.46	0.07	86.8	6.5	6.3	136	0.39	0.06	0.57	0.05
Küttigen	1	1066	West	0.08	1'250	0.20	26'565	0.93	0.51	68.5	25	6.3	143	0.45	0.08	0.94	0.41
	2	1066	Ost	0.15	1'250	0.28	3'857	0.49	0.07	85.3	5.8	6.3	155	0.43	0.06	0.60	0.06
	3	549	West	0.15	800	0.30	6'150	1.26	0.54	60.0	22	6.3	168	0.50	0.09	1.20	0.43
	4	549	Ost	0.15	800	0.31	4'162	0.47	0.06	85.8	5,2	6.3	137	0.41	0.06	0.57	0.05
Baden	1	330	West	0.06	1'600	0.12	26'989	0.31	0.05	88.7	5,7	6.3	93	0.28	0.05	0.45	0.04
	2	335	Ost	0.10	1'250	0.18	12'410	0.32	0.04	87.0	5,2	6.3	97	0.28	0.04	0.45	0.04
	3	595	West	0.13	2'000	0.18	13'021	0.35	0.06	86.8	5,9	6.3	106	0.31	0.05	0.48	0.05
	4	595	Ost	0.07	1'600	0.13	17'130	0.34	0.05	87.2	5,5	8.0	106	0.29	0.05	0.47	0.04
Eggenwil	1	151	Nord	0.04	3'150	0.17	11'782	0.47	0.07	86.4	4,9	8.0	166	0.43	0.06	0.58	0.06
	2	95	Süd	0.08	3'150	0.19	17'346	0.46	0.08	86.6	5,2	8.0	142	0.43	0.07	0.57	0.07
	3	200	Nord	0.05	2'500	0.14	13'916	0.46	0.07	86.0	5,3	6.3	148	0.42	0.07	0.57	0.05
	4	200	Süd	0.04	2'500	0.18	18'136	0.43	0.07	86.8	4,2	6.3	136	0.40	0.06	0.55	0.06

**Tab. 13** Ergebnisse der *in situ* Messungen auf den SDA 8 Deckschichten.

Messpunkt				Absorption			Ströwi	Textur									
Ort	MP	Position	Richtung	$\bar{\alpha}$	$f_{\max}$	$\alpha_{\max}$	$\bar{R}_s^*$	MPD	$\sigma_{\text{MPD}}$	g	$\sigma_g$	$\lambda_{\max}$	$R_{\text{eff,max}}$	RMS	$\sigma_{\text{RMS}}$	ETD	$\sigma_{\text{ETD}}$
		m		1	Hz	1	Pa·s/m	mm	mm	%	%	mm	μm	mm	mm	mm	mm
Hallwil	1	250	Ost	0.10	2'500	0.22	3'654	0.77	0.13	82.5	4.9	10.0	198	0.62	0.09	0.82	0.10
	2	400	West	0.09	2'000	0.23	4'187	0.80	0.12	81.9	6.4	8.0	209	0.60	0.09	0.84	0.09
	3	480	Ost	0.09	2'500	0.20	3'847	0.76	0.12	81.7	5.0	12.5	204	0.62	0.09	0.91	0.10
	4	480	West	0.12	1'000	0.25	2'731	0.85	0.15	81.2	6.7	12.5	228	0.62	0.11	0.88	0.12
Schöffland	1	100	Nord	0.13	3'150	0.24	3'451	0.68	0.14	83.7	5.3	12.5	218	0.59	0.10	0.74	0.11
	2	200	Süd	0.12	3'150	0.20	4'973	0.69	0.13	83.8	5.2	12.5	195	0.58	0.10	0.76	0.10
	3	300	Nord	0.15	3'150	0.27	2'754	0.69	0.11	83.1	5.0	12.5	191	0.59	0.09	0.75	0.09
	4	400	Süd	0.12	1'000	0.25	4'203	0.75	0.12	82.4	5.4	10.0	194	0.61	0.09	0.80	0.10
Oensingen	1	31	West	0.05	3'150	0.13	7'379	0.74	0.13	83.6	5.2	10.0	187	0.58	0.10	0.79	0.10
	2	57	Ost	0.06	2'500	0.13	9'846	0.74	0.14	82.9	6.0	12.5	210	0.61	0.11	0.79	0.11
	3	95	West	0.06	3'150	0.14	10'901	0.73	0.14	82.5	5.8	12.5	197	0.60	0.10	0.78	0.11
	4	95	Ost	0.07	3'150	0.16	6'393	0.74	0.13	83.8	5.4	12.5	198	0.60	0.10	0.79	0.11
Waltensch.	1	50	Ost	0.11	2'000	0.17	5'519	0.55	0.10	85.7	5.4	8.0	186	0.52	0.08	0.64	0.08
	2	50	West	0.10	2'000	0.16	9'782	0.52	0.11	85.6	5.0	12.5	156	0.48	0.09	0.62	0.09
	3	123	Ost	0.08	2'500	0.20	15'873	0.52	0.11	86.4	4.8	10.0	159	0.50	0.09	0.62	0.09
	4	123	West	0.05	3'150	0.14	48'231	0.39	0.09	87.8	5.4	12.5	127	0.40	0.08	0.51	0.07
Aarau	1	75	West	0.09	2'000	0.10	9'652	0.59	0.12	85.9	5.7	10.0	168	0.49	0.09	0.67	0.09
	2	75	Ost	0.07	2'000	0.10	11'901	0.54	0.10	87.1	5.3	10.0	146	0.45	0.09	0.64	0.08
	3	135	West	0.11	1'000	0.14	5'611	0.64	0.10	85.2	5.0	8.0	175	0.53	0.09	0.71	0.08
	4	135	Ost	0.05	650	0.09	8'069	0.53	0.09	85.9	4.6	10.0	156	0.46	0.08	0.63	0.07
Busslingen	1	100	Nord	0.08	1'600	0.17	2'107	0.83	0.15	78.8	5.7	10.0	252	0.72	0.10	0.86	0.12
	2	125	Süd	0.06	2'500	0.18	3'124	0.77	0.14	79.9	5.7	8.0	233	0.69	0.09	0.81	0.11
	3	285	Nord	0.09	3'150	0.23	2'694	0.81	0.15	78.9	5.6	12.5	245	0.71	0.10	0.85	0.12
	4	270	Süd	0.05	3'150	0.12	6'756	0.69	0.13	81.4	5.9	10.0	197	0.64	0.10	0.75	0.10

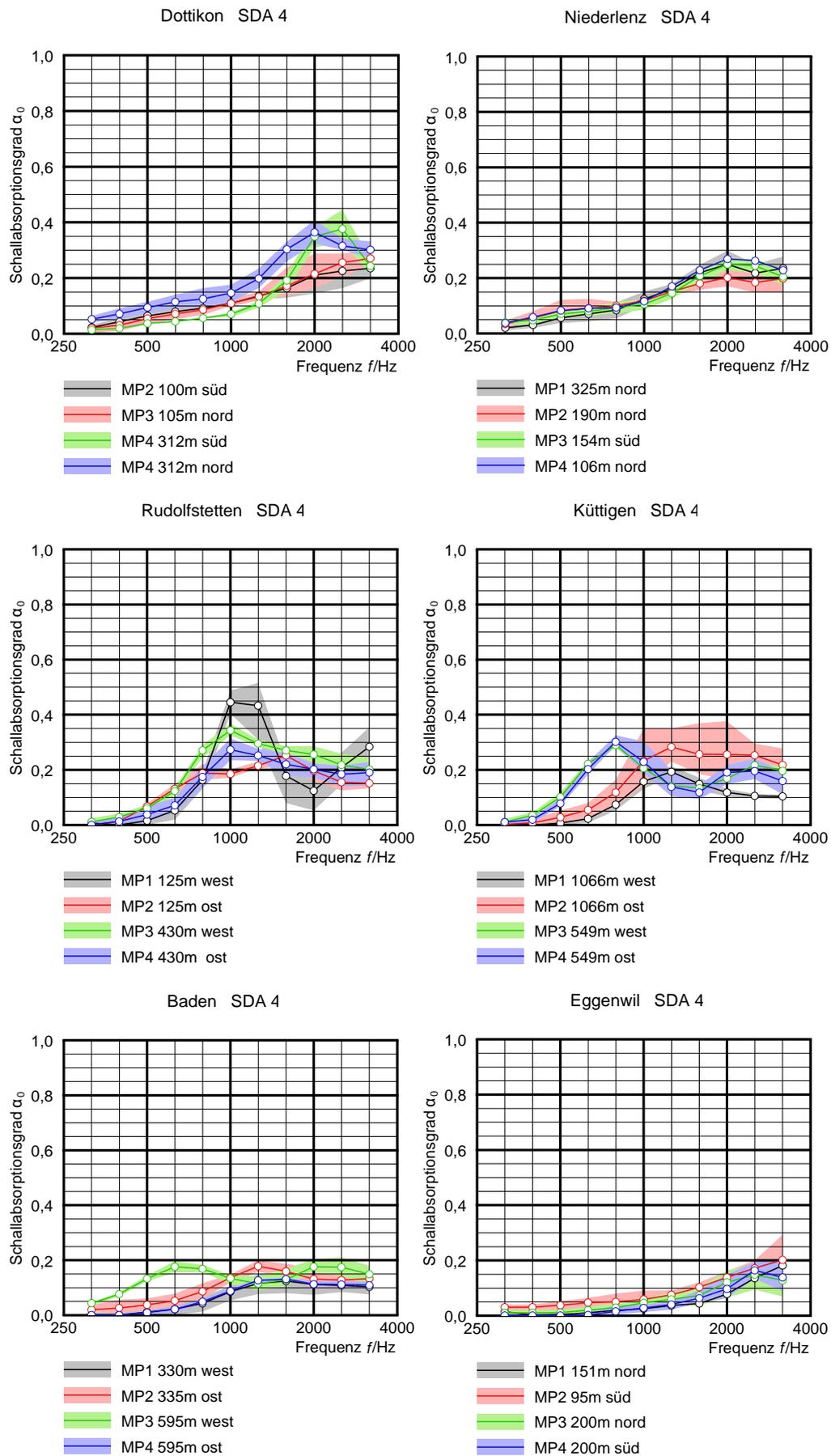
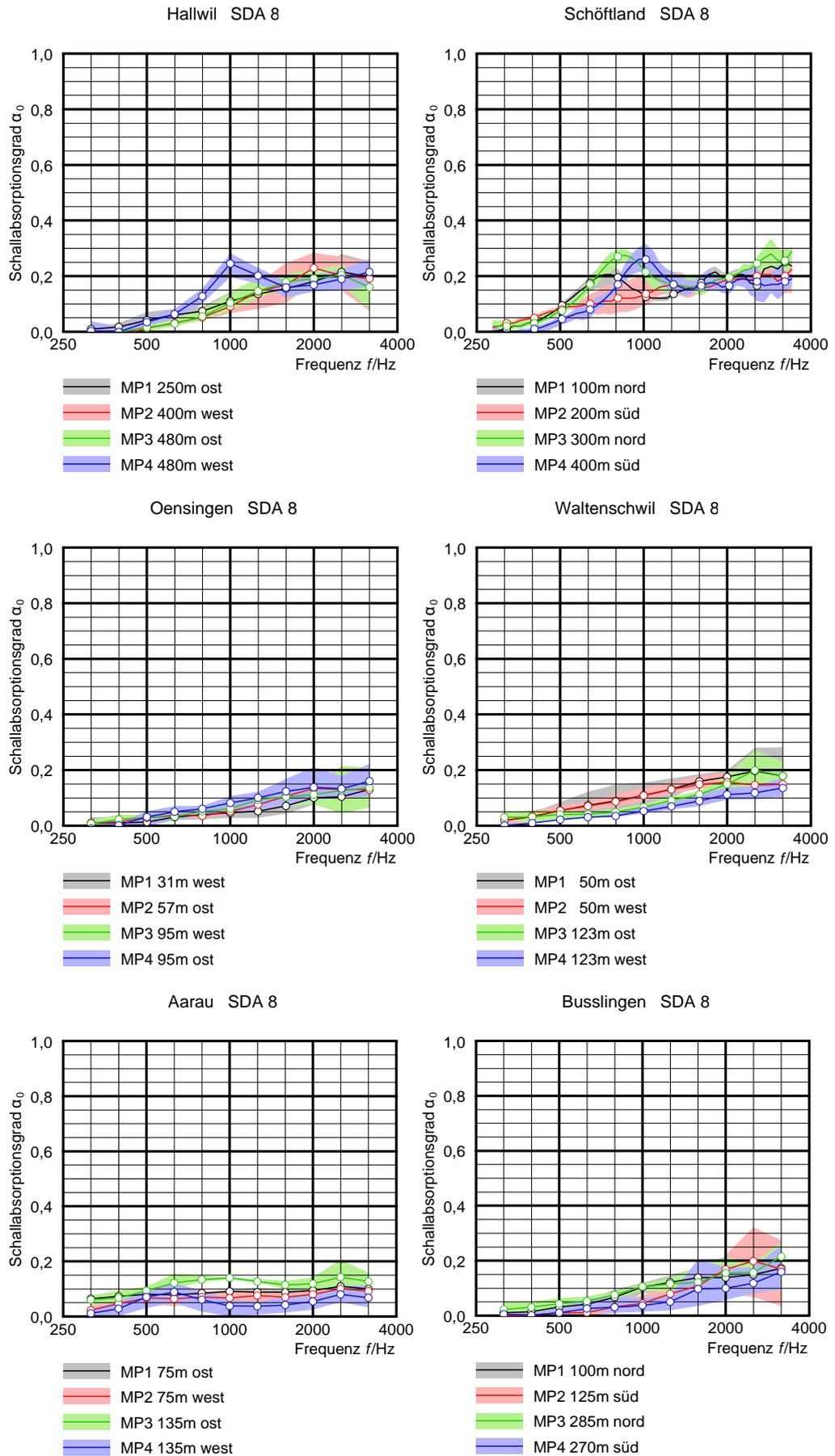


Abb. 17 Schallabsorptionsgradspektren aller SDA 4 Messpunkte (mit min-max Bereich).



**Abb. 18** Schallabsorptionsgradspektren aller SDA 8 Messpunkte (mit min-max Bereich).

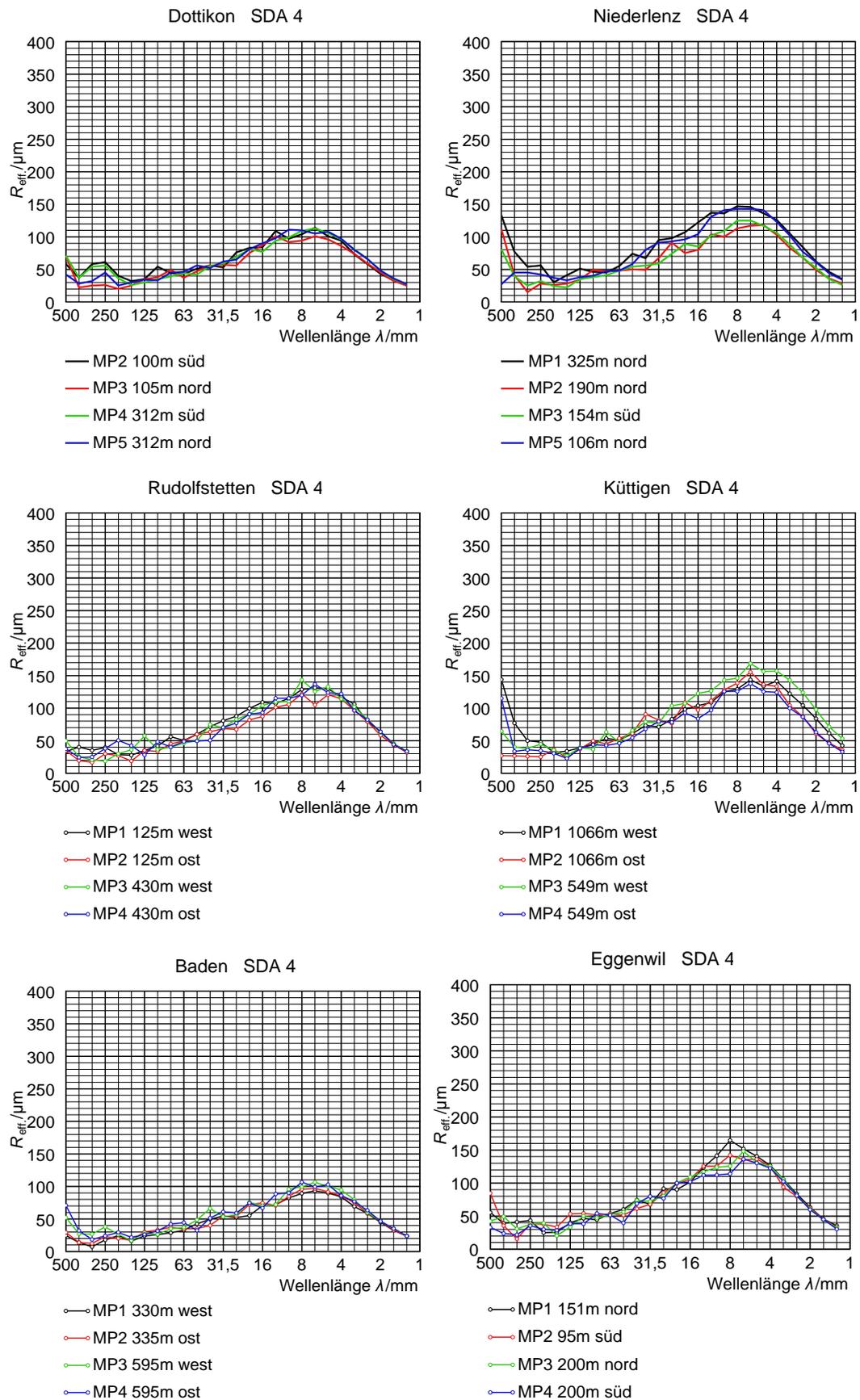


Abb. 19 *Textur-Wellenlängenspektren aller SDA 4 Messpunkte.*

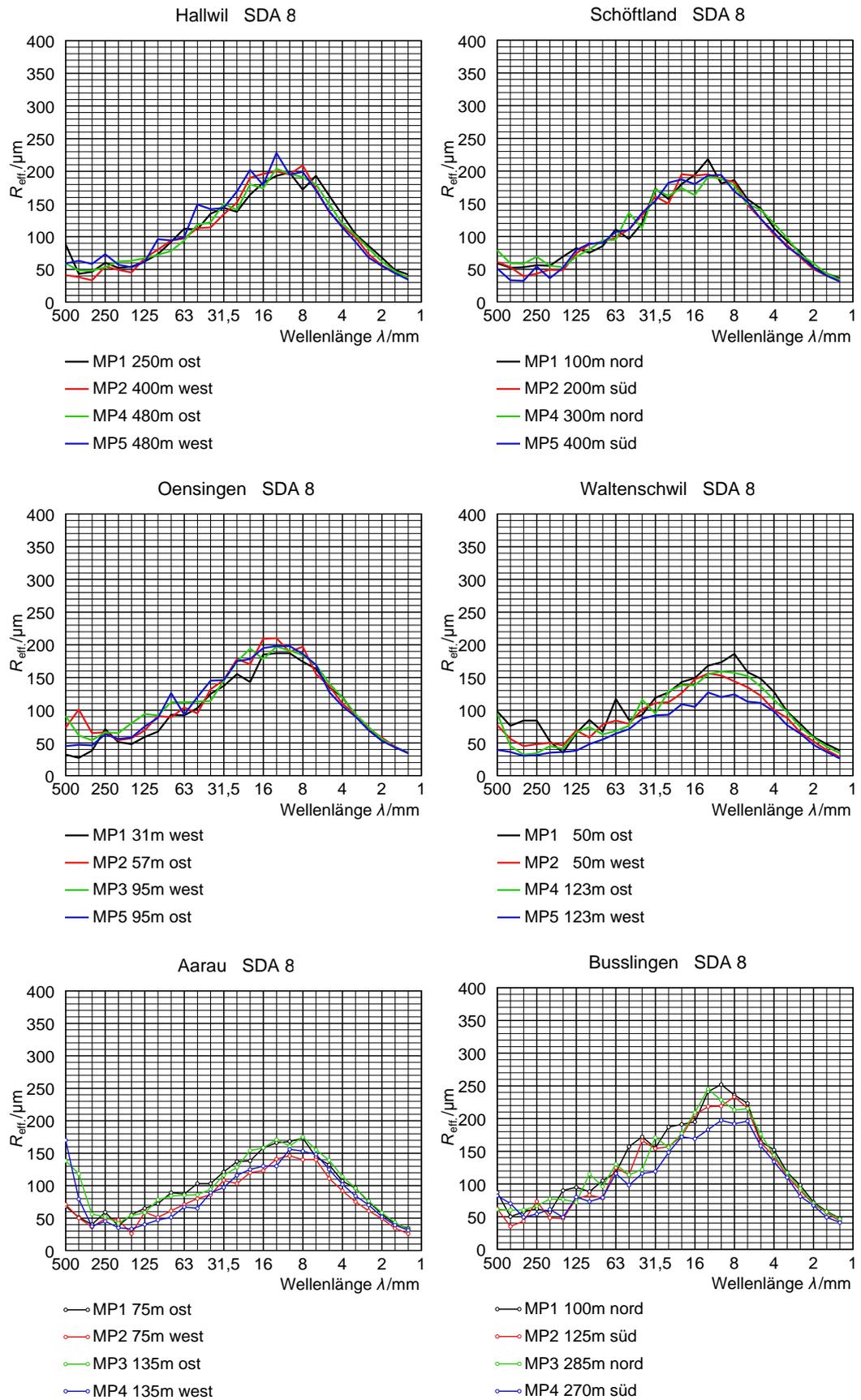


Abb. 20 Textur-Wellenlängenspektren aller SDA 8 Messpunkte.

## 2.7 Ergebnisse der bautechnischen Laboruntersuchungen

Bei jedem der beobachteten Einbauten wurden vier Mischgutproben entnommen von welchen jeweils eine nach einem vorgegebenen Untersuchungsprogramm analysiert wurde. Die anderen Proben dienten als Reserve insbesondere für den Fall, dass bei der ersten Probe ungewöhnliche Analyseergebnisse zu Tage treten. Nahe bei den Mischgutentnahmestellen wurden nach dem Einbau 150 mm Bohrkern gezogen und untersucht. Das Untersuchungsprogramm umfasste jeweils die Arbeiten aus Tab. 6. Die SNR 640 436 schreibt für einige der baustofflichen Messgrößen Bereiche vor, die einzuhalten sind (Tab. 14).

**Tab. 14** Richtwerte für semidichte Deckschichten nach SNR 640 436.

	SDA 4B	SDA 8B	SDA 4C	SDA 8C
Bindemittelgehalt, M.-%	≥ 6.0	≥ 5.8	≥ 6.0	≥ 5.8
Indirekte Zugfestigkeit, ITSR	≥ 70	≥ 70	≥ 70	≥ 70
Schichtdicke, mm	20 ... 35	25 ... 40	20 ... 35	25 ... 40
Hohlraumgehalt Marshall, Verfahren D, Mittelwert, Vol.-%	10 ... 14	10 ... 14	14 ... 18	14 ... 18
Hohlraumgehalt Bohrkern Verfahren D, Mittelwert, Vol.-%	10 ... 18	10 ... 16	14 ... 22	14 ... 20
Verdichtungsgrad, Mittelwert, %	≥ 98	≥ 98	≥ 98	≥ 98

Bei den zwölf beobachteten Einbauten führte die Baustoffprüfung des Mischguts und der Bohrkern zu den Parametern in Tab. 15 und Tab. 16. Die präsentierten Bohrkernergebnisse sind jeweils über die vier entnommenen Bohrkern gemittelt. Neben den Prüfergebnissen selbst sind auch die Mittelwerte und die prozentualen Standardabweichungen  $\sigma$  über die sechs Einbauten jeden Belagstyps angegeben. Werte für die elastische Rückstellung in Eggenwil und Schöffland liegen nicht vor, wie auch der module de richesse in Eggenwil und der Stabilitätswert in Küttigen. Neben den normgemässen bautechnischen Prüfparametern wurden hier noch Einzelparameter zur Charakterisierung der Sieblinien in Tab. 15 und Tab. 16 eingeführt.

Die Abweichungen des Kornanteils  $d_i$  bei einer bestimmten Korngrösse  $i$  von dem entsprechenden Wert  $c_i$  auf einer Referenzkurve, wie z.B. der im Rahmen des EP1 vorgeschlagenen Kurve, werden hier durch die mittlere quadratische Abweichung *RMS-Abweichung* an den  $n$  Stützstellen angegeben mit

$$\text{RMS-Abweichung} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i (c_i - d_i)^2}$$

und durch den Maximalwert der Abweichungen. Nach diesen Zahlen weichen die Korngrössenverteilungen für die SDA 8 Mischgutproben deutlich stärker von den Sieblinien des EP1 ab als die SDA 4 Mischgutproben. Die EP1-Sieblinien wurden allerdings eher auf bautechnische Eigenschaften hin optimiert, nicht so sehr für eine optimale akustische Performanz. Deshalb werden weitere Sieblinienattribute herangezogen: die mittlere quadratische Abweichung von der oberen und von der unteren Grenzkurve der SNR 640 436, der akkumulierte Feinmassenanteil der Gesteinskörner bis 0.063 mm und derjenige bis zum halben Grösstkorn (2 mm für SDA 4, 4 mm für SDA 8). Zusätzlich wurde noch die Krümmung der Sieblinie beim halben Grösstkorn betrachtet. Die drei letzten Parameter hängen zusammen: Ein hoher Feinanteil trägt zum akkumulierten Massenanteil bei halbem Grösstkorn bei, der Einfluss auf die Kurvenkrümmung an diesem Punkt hat.

Die aus dem Mischgut bestimmten Sieblinien finden sich in Abb. 21 und Abb. 22. Gegenüber den Empfehlungen für die Sieblinien aus dem EP1-Projekt liegen die SDA 4 und SDA 8 Sieblinien fast immer darunter. Die Hälfte der SDA 4-Korngrössenverteilungen zeigen beinahe einen rechteckigen Verlauf, bei welchem ein zunächst sehr flacher Kurvenverlauf nach einem Abknickpunkt bei 2 mm steil nach oben weist (Niederlenz, Kütti-

gen, Eggenwil). Beim SDA 8 liegen die Mischgutsiebkurven bis zu rund 4 mm unterhalb der EP1-Kurve und steigen dann steil an, um die EP1-Kurve zu schneiden. Die Sieblinien liegen selten gleichmässig zwischen den unteren und oberen Grenzkurven der Norm, sondern tendieren zu einem eher niedrigen Gehalt kleiner und mittlerer Korngrössen und einem überproportional hohen Anteil der grössten Körner. Die Kornverteilung ist dadurch insgesamt weniger ausgewogen.

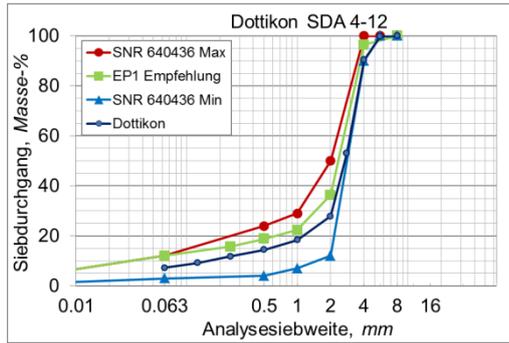
**Tab. 15** Ergebnisse der bautechnischen Untersuchungen für die SDA 4 Deckschichten.

	Dotti- kon	Nieder- lenz	Rudolf- stetten	Kütti- gen	Baden	Eggen- wil	Mittel- wert	$\sigma$ in %
<b>Bindemittel</b>								
Bindemittelgehalt, M.-%	5.85	6.33	5.82	5.84	5.83	6.28	5.99	3.7
Nadelpenetration, 0.1 mm	35	44	43	41	40	49	42.0	10.1
Erweichungspunkt RuK, °C	71.8	67.2	69.0	69.6	65.6	64.8	68.0	3.5
Penetrationsindex	2.2	2.0	2.3	2.3	1.5	1.9	2.03	13.8
El. Rückstellung bei mm 200, %	78	81	82	80	76	-	79.4	2.7
<b>Marshallprobekörper</b>								
Korngrössenvertlg. eingehalten	ja	nein	ja	ja	ja	nein		
RMS-Abweichung von EP1 Korngrössenverteilung, %	5.09	8.34	5.59	8.48	4.29	14.51	7.7	44.4
Max. Abweichung von EP 1 Korngrössenverteilung, %	8.40	19.20	8.40	18.40	6.40	31.80	15.4	57.4
RMS-Abweichung von oberer Grenzkurve nach SNR 640 436	10.8	14.5	10.8	14.5	10.0	14.1	12.4	15.7
RMS-Abweichung von unterer Grenzkurve nach SNR 640 436	8.5	6.3	8.5	5.7	9.0	5.9	7.3	18.7
Feinanteil Korngrössenvert., %	7.2	12.3	6.3	10.5	8.1	11.0	9.2	23.5
Akk. 2mm-Anteil Korngrössen- verteilung, %	27.9	17.1	27.9	17.9	29.9	17.0	23.0	24.7
Sieblinienkrümmung bei 2mm, %/mm <sup>2</sup>	21.8	26.7	21.8	41.7	23.2	21.3	26.1	27.6
Rohdichte Mischgut, kg/m <sup>3</sup>	2460	2419	2428	2424	2433	2423	2431.2	0.6
Raumdichte Ausmessverf. D, kg/m <sup>3</sup>	2083	2025	1952	1954	2072	2016	2017.0	2.5
Hohlraumgehalt VM Verfahren D, Vol.-%	15.3	16.3	19.6	19.4	14.8	16.8	17.0	10.9
Rohdichte Mineral, berechnet, kg/m <sup>3</sup>	2692	2662	2650	2646	2657	2423	2621.7	3.4
Raumdichte Tauchw. Verfahren B, kg/m <sup>3</sup>	2124	2088	2043	2064	2124	2086	2088.2	1.4
Hohlraumgehalt VM Verfahren B, Vol.-%	13.7	13.7	15.9	14.9	12.7	13.9	14.1	7.2
Module de richesse	3.8	3.7	3.5	3.5	3.6	-	3.62	3.2
Stabilität S, kN	11.0	9.7	7.1	-	9.7	6.7	8.8	18.7
tan. Fließwert Ft, mm	1.3	1.4	1.3	1.4	1.4	2.1	1.5	18.8
<b>Bohrkerne</b>								
Schichtdicke, mm	35	34	32	37	39	33	34.8	7.2
Raumdichte Verfahren B, kg/m <sup>3</sup>	2084	2097	2035	2056	2124	2087	2080.3	1.4
Hohlraumgehalt Verfahren B, %	15.3	13.3	16.2	15.2	12.7	14.2	14.5	8.3
Verdichtungsgrad Verf. B, %	98.1	100.4	99.6	99.6	100.0	97.5	99.2	1.1
Raumdichte Verfahren D, kg/m <sup>3</sup>	2031	2053	1994	2020	2093	2048	2039.6	1.5
Hohlraumgehalt Verfahren D, %	17.4	15.2	17.9	16.7	14.0	15.8	16.2	8.2
Verdichtungsgrad Verf. D, %	97.5	101.4	102.2	103.4	101.0	95.7	100.2	2.7

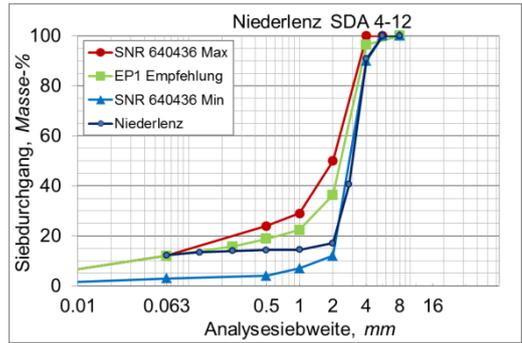
**Tab. 16** Ergebnisse der bautechnischen Untersuchungen für die SDA 8 Deckschichten.

	Hall- wil	Oensin- gen	Schöft- land	Walten- schwil	Aarau	Buss- lingen	Mittel- wert	$\sigma$ in %
<b>Bindemittel</b>								
Bindemittelgehalt, Masse-%	5.5	5.62	5.49	5.79	5.4	5.56	5.56	2.2
Nadelpenetration, 0,1 mm	33	45	35	44	42	41	40	11.2
Erweichungspunkt RuK, °C	72.6	67.4	70.2	67.2	64	71.2	68.8	4.2
Penetrationsindex	2.2	2.1	2.0	2.0	1.4	2.5	2.03	16.2
El. Rückstellung bei mm 200, %	70	80	-	80	80	82	78.4	5.4
<b>Marshallprobekörper</b>								
Korngrößenvertlg. eingehalten	ja	ja	ja	nein	ja	ja		
RMS-Abweichung von EP1 Korngrößenverteilung, %	4.86	5.56	3.74	4.64	4.33	4.63	4.6	11.8
Max. Abweichung von EP 1 Korngrößenverteilung, %	6.90	7.20	4.60	5.90	5.70	6.00	6.1	14.0
RMS-Abweichung von oberer Grenzkurve nach SNR 640 436	12.6	13.3	10.3	9.1	9.5	12.2	11.2	14.4
RMS-Abweichung von unterer Grenzkurve nach SNR 640 436	6.7	5.5	8.8	10.4	9.9	7.0	8.1	22.0
Feinanteil Korngrößenvert., %	6.3	5.7	7.6	4.7	5.8	6.1	6.0	14.3
Akk. 2mm-Anteil Korngrößen- verteilung, %	27.1	25.7	34.7	39.1	38.1	21.1	31.0	21.7
Sieblinienkrümmung bei 2mm, %/mm <sup>2</sup>	13.1	11.6	6.0	10.8	8.0	13.4	10.5	25.3
Rohdichte Mischgut, kg/m <sup>3</sup>	2454	2440	2435	2436	2443	2455	2443.8	0.3
Raumdichte Ausmessverf. D, kg/m <sup>3</sup>	2040	2133	2067	2100	2091	2053	2080.7	1.5
Hohlraumgehalt VM Verfahren D, Vol.-%	16.9	12.6	15.1	13.8	14.4	16.4	14.9	9.9
Rohdichte Mineral, berechnet, kg/m <sup>3</sup>	2669	2657	2645	2659	2651	2673	2659.0	0.4
Raumdichte Tauchw. Verfahren B, kg/m <sup>3</sup>	2141	2204	2157	2160	2172	2177	2168.5	0.9
Hohlraumgehalt VM Verfahren B, Vol.-%	12.8	9.7	11.4	11.3	11.1	11.3	11.3	8.0
Module de richesse	3.7	3.6	3.7	4.0	3.6	3.7	3.72	3.6
Stabilität S, kN	9.0	9.9	8.7	10.8	9	9.2	9.43	7.6
tan. Fließwert Ft , mm	1.3	1.4	1.3	1.5	1.4	1.4	1.38	5.0
<b>Bohrkerne</b>								
Schichtdicke, mm	30	35	34	34	43	33	34.7	11.0
Raumdichte Verfahren B, kg/m <sup>3</sup>	2153	2244	2129	2195	2193	2099	2168.6	2.2
Hohlraumgehalt Verfahren B, %	12.3	8.0	11.9	9.9	10.3	14.5	11.1	18.4
Verdichtungsgrad Verf. B, %	100.6	101.8	99.5	101.6	101.0	96.4	100.1	1.8
Raumdichte Verfahren D, kg/m <sup>3</sup>	2076	2179	2069	2156	2155	2028	2110.2	2.6
Hohlraumgehalt Verfahren D, %	15.4	10.7	15.1	11.5	11.8	17.4	13.7	17.9
Verdichtungsgrad Verf. D, %	101.7	102.2	100.1	102.7	101.0	96.4	100.7	2.1

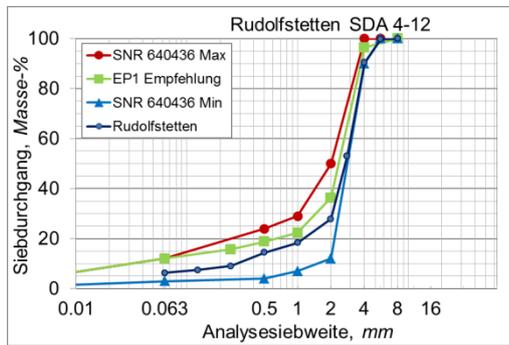
**SDA 4 Dottikon**



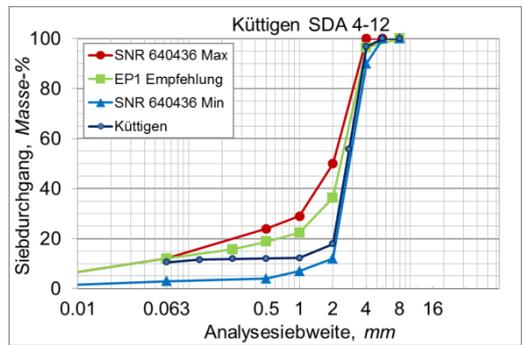
**SDA 4 Niederlenz**



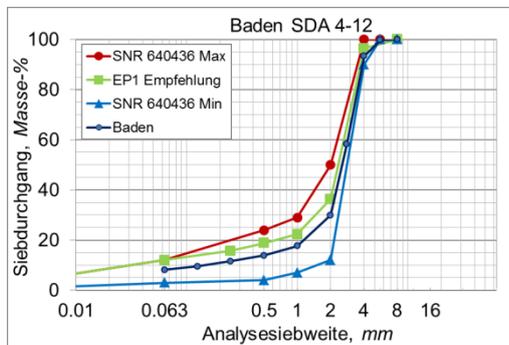
**SDA 4 Rudolfstetten**



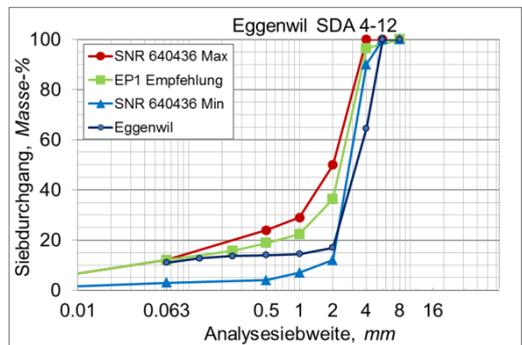
**SDA 4 Küttigen**



**SDA 4 Baden**

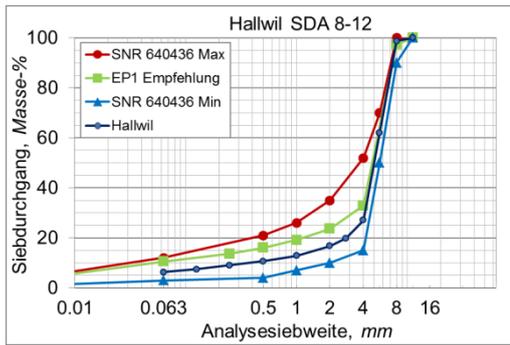


**SDA 4 Eggenwil**

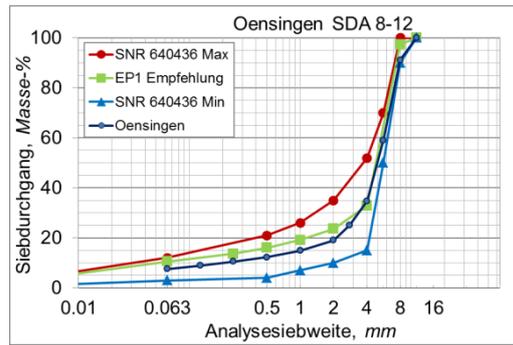


**Abb. 21** Siebkurven der Mischgutproben von den SDA 4 Einbauten.

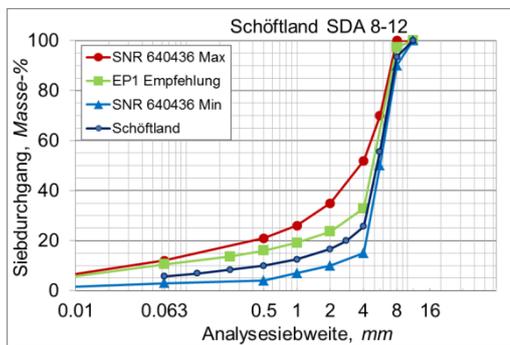
**SDA 8 Hallwil**



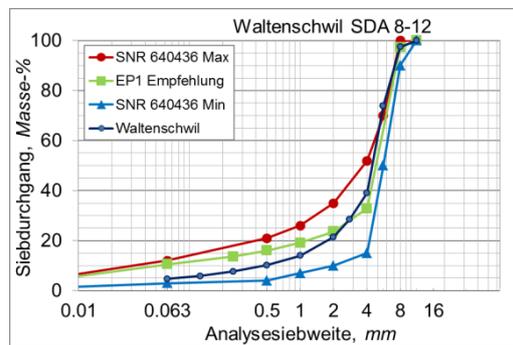
**SDA 8 Oensingen**



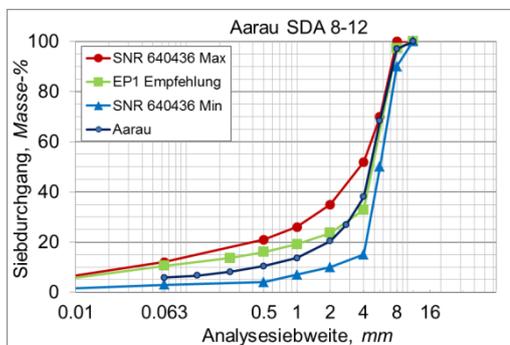
**SDA 8 Schöffland**



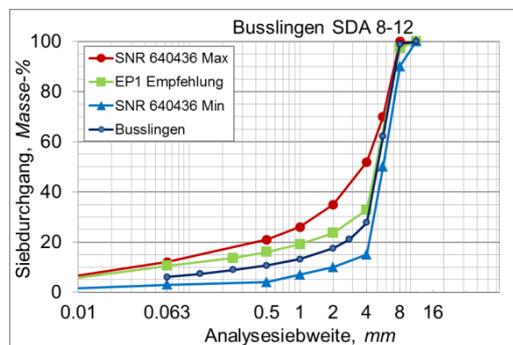
**SDA 8 Waltenschwil**



**SDA 8 Aarau**



**SDA 8 Busslingen**



**Abb. 22** Siebkurven der Mischgutproben von den SDA 8 Einbauten.

**Tab. 17** Kurzbewertung der Laborergebnisse (BM=Bindemittel-, HR=Hohlraumgehalt).

Ort	Belag	Mischgut	Bohrkerne	Hohlraumbereich Bohrkerne
Dottikon	4	BM zu niedrig, HR zu hoch für SDA 4B	ok	eher hoch
Niederlenz	4	Sieblinie rechts ausserhalb, HR zu hoch für SDA 4B	ok	eher niedrig
Rudolfstetten	4	BM zu niedrig, HR zu hoch für SDA 4B	ok	eher zu hoch
Küttigen	4	BM zu niedrig, HR zu hoch für SDA 4B	zu dick	eher zu hoch
Baden	4	BM zu niedrig, HR zu hoch für SDA 4B	zu dick	eher niedrig
Eggenwil	4	Sieblinie rechts ausserhalb, HR zu hoch für SDA 4B	ok	eher mittel
Hallwil	8	BM zu niedrig, HR zu hoch für SDA 8B	ok	eher mittel
Schöffland	8	BM zu niedrig, HR zu hoch für SDA 8B	ok	eher mittel
Oensingen	8	BM zu niedrig	ok	eher niedrig
Waltenschwil	8	Sieblinie links ausserhalb	ok	eher niedrig
Aarau	8	BM zu niedrig	zu dick	eher niedrig
Busslingen	8	BM zu niedrig, HR zu hoch für SDA 8B	ok	eher mittel

Die meisten Vorgaben der SNR 640 436 (vergleiche Tab. 14) werden eingehalten, Tab. 17 enthüllt jedoch erwähnenswerte Ausnahmen:

- Der Bindemittelgehalt ist bei den meisten SDA 4- und allen SDA 8-Baustellen niedriger als in der Norm für diese Bauweisen vorgegeben.
- Im SDA 8 in Hallwil, Schöffland und Busslingen ist der Hohlraumgehalt des Marshallprobekörpers jeweils zu hoch für einen SDA 8, ebenso wie bei allen SDA 4 Mischgutproben. Letzteres ist natürlich auch auf die Ausschreibung als „SDA B Typ Aargau“ zurückzuführen. Selbst die Vorgabe des Kantons Aargau von 10 bis 14 Vol.-% nach Verfahren B wurde von den SDA 8 Marshallprobekörpern nur knapp oder gar nicht eingehalten. Der deutlich zu hohe Hohlraumgehalt in Rudolfstetten führte zu einer Wertminderung des Bauwerks mit einem entsprechenden Kostenabzug durch den Auftraggeber.
- Die Korngrössenverteilungen des SDA 8 von Waltenschwil enthalten zu viele Körner mit 5.6 mm Durchmesser und in Niederlenz sind zu wenige Körner der Grösse 2.8 mm enthalten. In Eggenwil finden sich zu wenige Körner der Grösse 4 mm, verglichen mit den Vorgaben der SNR 640 436.
- Die Deckschichten in Aarau (+3 mm), Küttigen (+2 mm) und Baden (+4 mm) sind im Mittel etwas dicker als in der SNR 640 436 vorgesehen.

Bei der Betrachtung der Kennwerte aus Tab. 15 und Tab. 16 sollte man berücksichtigen, dass verschiedene Parameter zueinander in enger Beziehung stehen. So gibt der Verdichtungsgrad das Verhältnis der Raumdichte des Bohrkerens zur Raumdichte des Marshallprobekörpers wieder. In den Penetrationsindex gehen Nadelpenetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel ein. Der Hohlraumgehalt berechnet sich aus der Differenz von Rohdichte zur Raumdichte geteilt durch die Rohdichte, jeweils bestimmt nach dem gleichen Verfahren (Ausmessung oder Tauchwägung).

Die Varianz der bautechnischen Parameter über die Einbauten hinweg ist für einige Parameter recht gering, so dass sie für eine Bestimmung statistischer Zusammenhänge mit anderen bautechnischen oder akustischen Parametern kein grosses Potenzial besteht,

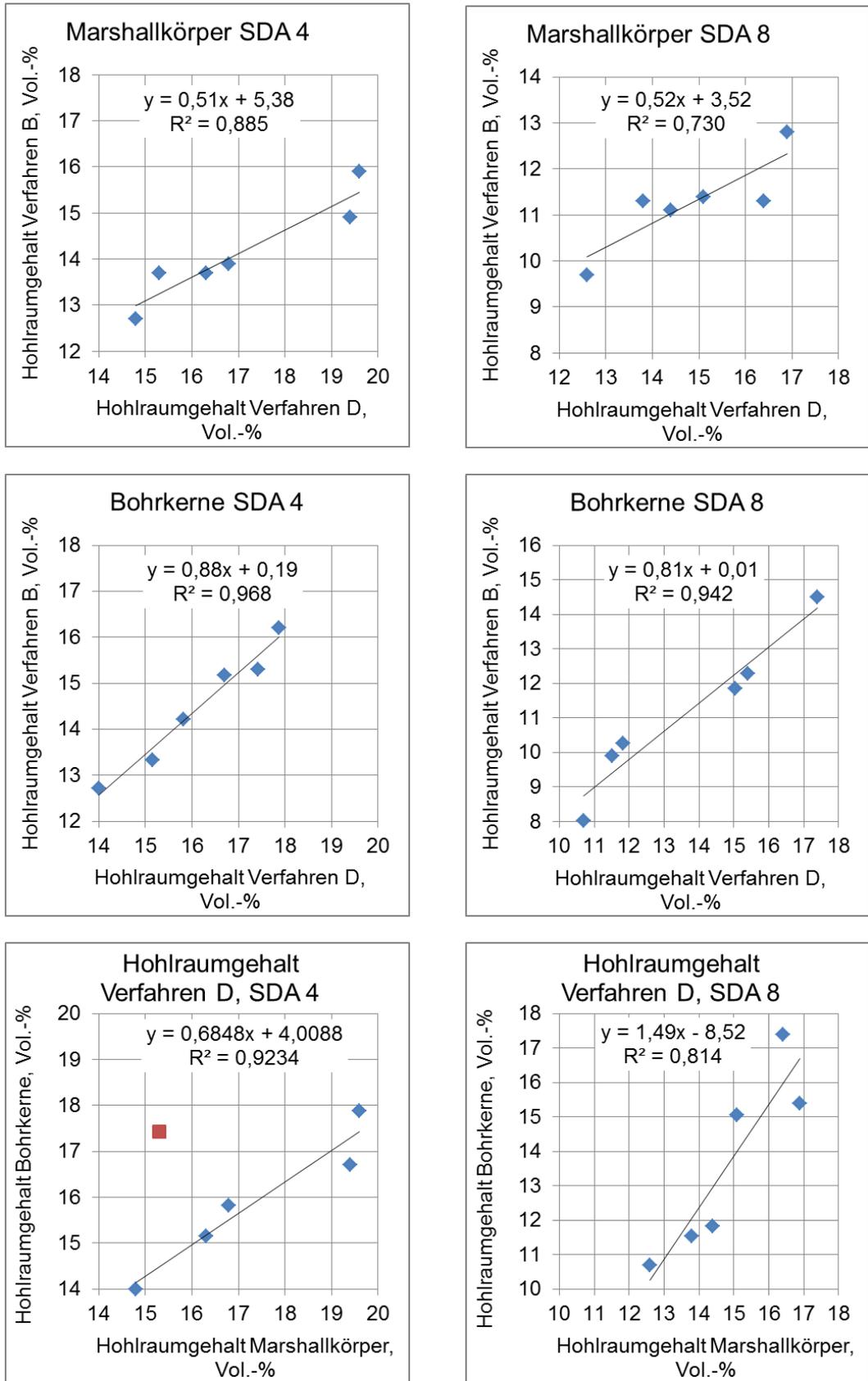
wie z.B. die Roh- oder Raumdichte. Andere Kenngrößen zeigen eine beachtliche Standardabweichung. Dies gilt insbesondere für den Hohlraumgehalt, wobei die Schwankung bei den Bohrkernen grösser ist als bei den Marshallprobekörpern, was auf Unterschiede im Einbauprozess entlang der Strecke zurückzuführen sein dürfte. Stabilität und tangentialer Fließwert schwanken bei den SDA 4-Marshallprobekörpern sehr viel stärker als bei den SDA 8-Marshallprobekörpern. Ein Blick auf die Standardabweichung allein kann bei so kleinen Stichproben aber leicht in die Irre führen. So ist für die hohe Standardabweichung des Fließwerts beim SDA 8 im Wesentlichen nur der Einbau in Eggenwil verantwortlich.

Der Hohlraumgehalt ist bautechnisch wie auch akustisch von grosser Bedeutung. Deshalb lohnt sich ein Blick auf die unterschiedlichen Hohlraumgehaltswerte als Funktion des Prüfobjekttyps (Bohrkerne oder Marshallprobekörper) und des Messverfahrens (Ausmessverfahren = Verfahren D oder Tauchwägewerfahren = Verfahren B). Die entsprechenden Diagramme (*Abb. 23*) zeigen Folgendes:

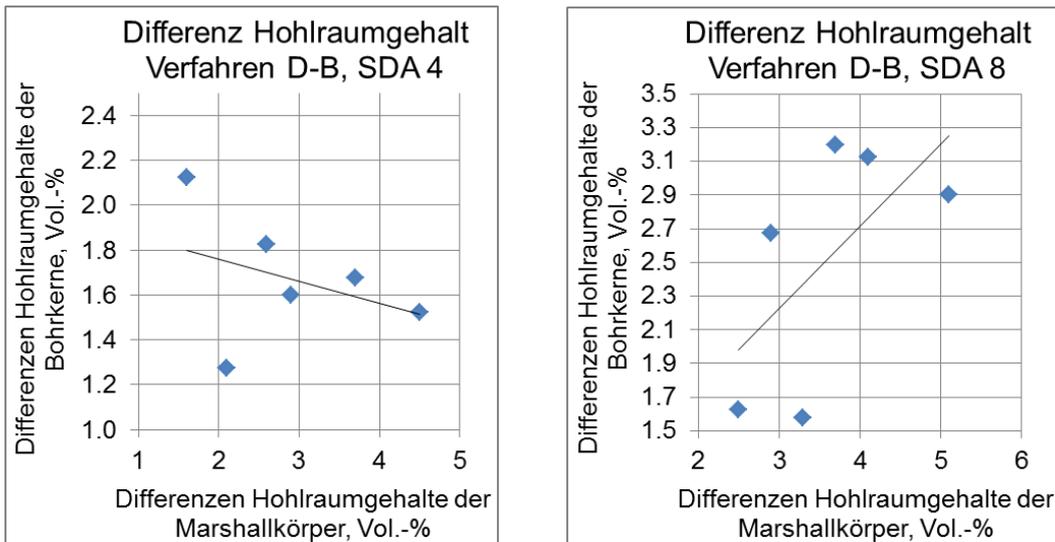
- Die Hohlraumgehalte via Tauchwägewerfahren und Ausmessverfahren korrelieren miteinander recht gut, wobei der Zusammenhang bei Marshallprobekörpern und Bohrkernen unterschiedlich und bei Bohrkernen statistisch besonders gut abgesichert ist. Bei Marshallprobekörpern beträgt die Spannweite beider Bauweisen beim Tauchwägewerfahren nur etwa drei Volumenprozent, beim Ausmessverfahren sind es gut fünf Volumenprozent. Bei beiden Messverfahren beträgt bei den SDA 4 Bohrkernen die Spannweite der Hohlraumwerte nur etwa drei bis vier Prozent, beim SDA 8 rund sieben Prozent.
- Die Hohlraumgehalte der Marshallprobekörper und der Bohrkern vom selben Einbau korrelieren im Allgemeinen recht gut miteinander (der Ausreisser bei den SDA 4B beruht auf dem Einbau in Dottikon). In der Regel sind die Bohrkernhohlraumgehalte um 1 bis gut 2.5 Volumenprozent niedriger als die der Marshallprobekörper. Ausnahmsweise liegt der Bohrkernhohlraumgehalt aber über dem des Marshallprobekörpers (Dottikon) oder er ist gleich (Schöffland).

In *Abb. 24* werden die Differenzen zwischen beiden Verfahren zur Hohlraumbestimmung betrachtet. Das Ausmessen (Verfahren D) liefert immer höhere Werte als das Tauchwägen (Verfahren B). Beim SDA 4 ergibt das Verfahren D für Marshallprobekörper Differenzen zwischen 1.6 Vol.-% und 4.5 Vol.-% und damit eine Spanne von fast 3 Vol.-%. Bei SDA 4 Bohrkernen liegen die Differenzen zwischen 1.3 Vol.-% und 2.1 Vol.-%, d.h. innerhalb einer Spanne von 0.8 Vol.-%. Beim SDA 8 ergibt das Verfahren D für Marshallprobekörper Differenzen zwischen 2.5 Vol.-% und 5.1 Vol.-% und damit eine Spanne von fast 2.6 Vol.-%. Bei SDA 8 Bohrkernen liegen die Differenzen zwischen 1.6 Vol.-% und 3.2 Vol.-%, d.h. innerhalb einer Spanne von 1.6 Vol.-%. Aus diesen Zahlen und den Abbildungen *Abb. 23* und *Abb. 24* ergibt sich, dass man Hohlraumgehalte, die mit verschiedenen Verfahren bestimmt wurden, nicht ohne weiteres ineinander umrechnen kann. Deshalb ist es besonders wichtig, auf welches der beiden Verfahren in einer Ausschreibung Bezug genommen wurde.

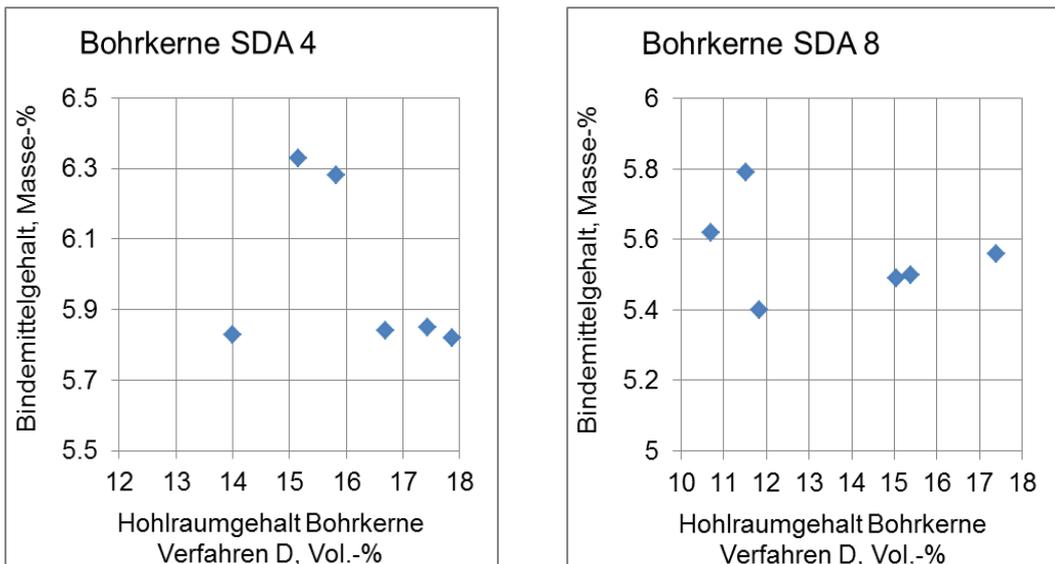
Ein höherer Bindemittelgehalt impliziert grundsätzlich einen niedrigeren Hohlraumgehalt, weil das Bindemittel den Raum zwischen den Asphaltpartikeln füllt. *Abb. 25* illustriert jedoch, dass es in der vorliegenden engen Datenbasis keinen so einfachen Zusammenhang gibt.



**Abb. 23** Hohlraumgehalte für die SDA 4 Einbauten (links) und die SDA 8 Einbauten (rechts) für Marshallprobekörper (oben), Bohrkerne (mittig) und im direkten Vergleich (unten).



**Abb. 24** Differenzen der Hohlraumgehalte nach Ausmessen (Verfahren D) und nach Tauchwägung (Verfahren B) für die SDA 4 Einbauten (links) und die SDA 8 Einbauten (rechts).



**Abb. 25** Bindemittelgehalt versus Hohlraumgehalte für die SDA 4 Einbauten (links) und die SDA 8 Einbauten (rechts).

## 2.8 Variabilität bautechnischer und akustischer Eigenschaften

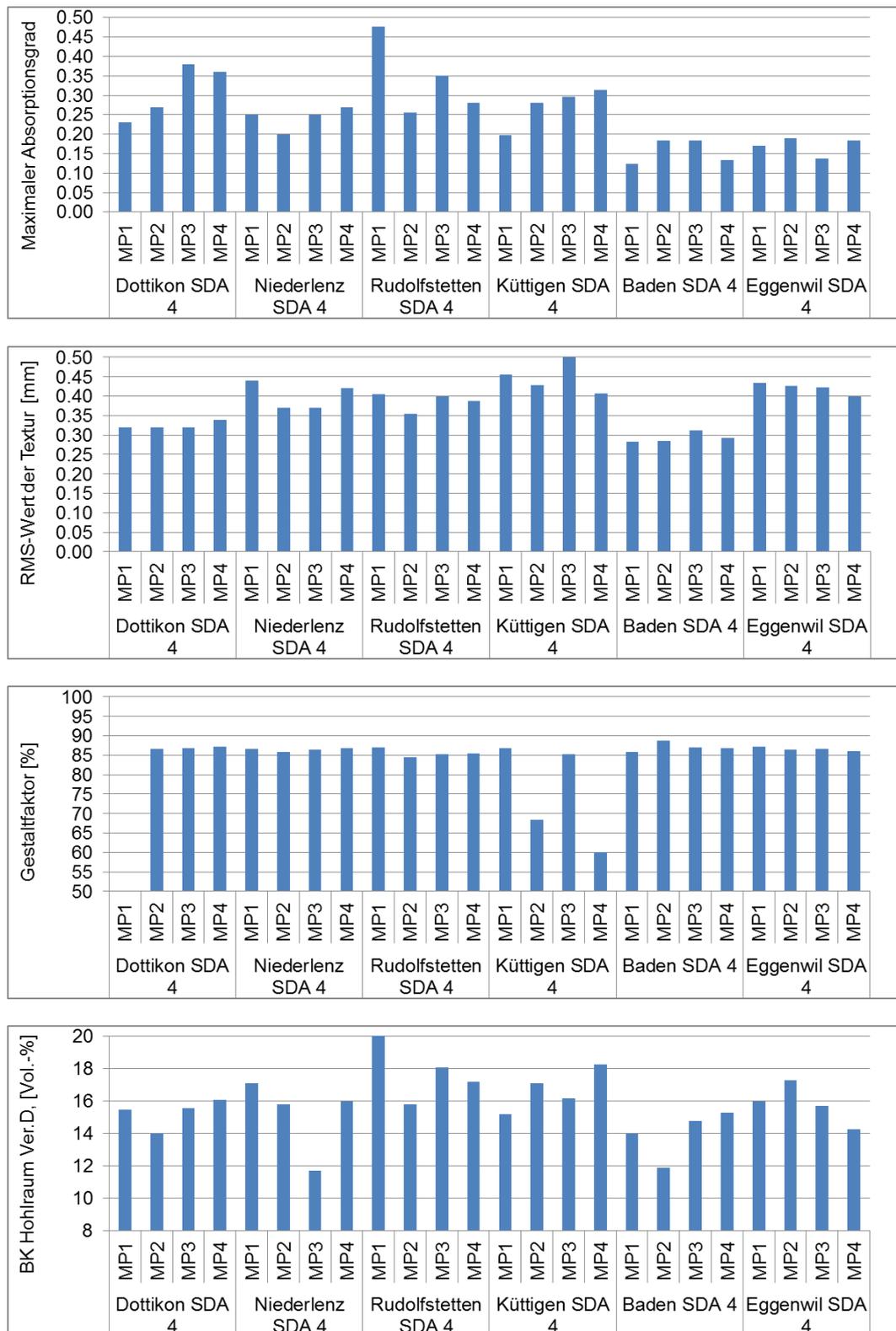
Bei der Variabilität der bautechnischen und akustischen Eigenschaften muss zwischen verschiedenen Betrachtungsweisen unterschieden werden:

1. Der Variabilität von Einzelmesswerten, die zu einem charakteristischen Mittelwert am selben Messpunkt führt (z.B. von mehreren Messungen des Absorptionsgradspektrums im Abstand weniger Zentimeter, die arithmetisch gemittelt werden; siehe farbige Bänder in *Abb. 17* und *Abb. 18*)
2. Der Variabilität zwischen verschiedenen Messpunkten entlang eines Einbaus (z.B. zwischen den vier in situ Messpunkten entlang der Projektstrecken; siehe z.B. verschiedenfarbige Kurven in *Abb. 17* und *Abb. 18*)
3. Der Variabilität zwischen verschiedenen Einbauten des gleichen Belagstyps (z.B. wenn man die vier Absorptionsgradkurven für jede SDA 8 Strecke in *Abb. 18* zu je einer Kurve pro Einbau mittelt und dann untereinander vergleicht).

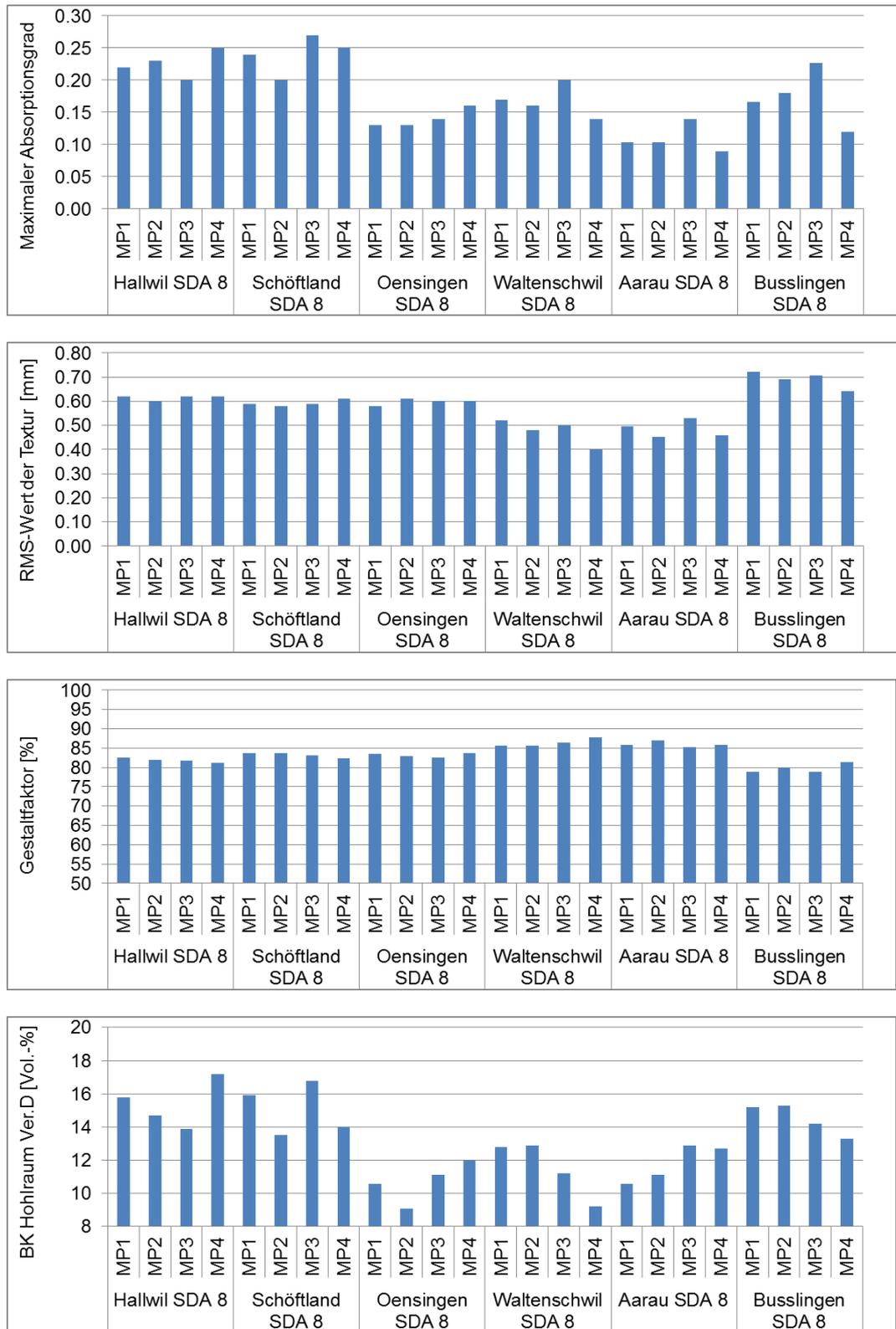
Nur bei wenigen Beobachtungsgrößen stehen mehrere Einzelmesswerte pro Messpunkt entlang einer Strecke zur Verfügung. Deshalb sind Quervergleiche der Varianzen zwischen verschiedenen Beobachtungsgrößen nur bei wenigen Kombinationen von Messparametern möglich. Solche Vergleiche sind auch schwierig zu bewerten, weil die Varianzen auch vom jeweiligen Messverfahren und der Messgröße geprägt sind.

Wenn an mehreren Messpunkten entlang einer Strecke gemessen wird, kann die Variabilität der Einzelmesswerte Aussagen über die Homogenität eines Belageinbaus treffen. In der Baupraxis ist die Anzahl dieser Messpunkte aber eher gering. Eine Darstellung der Beobachtungsparameter maximaler Absorptionsgrad (oben), RMS-Wert der Textur (mittig oben), Texturgestaltfaktor (mittig unten) und Hohlraumgehalt der Bohrkerne nach Verfahren D (unten) für die vier in situ Messpunkte pro Strecke zeigt *Abb. 26* für die SDA 4 Deckschichten. Bemerkenswert sind die niedrigen Gestaltfaktoren an zwei Messpunkten in Küttigen, was sich in den anderen Parametern nicht auffällig widerspiegelt. Der Absorptionsgrad fluktuiert entlang der Einbaustrecken am stärksten, aber auch die Hohlraumgehalte der Bohrkerne schwanken recht stark. Die entsprechenden Histogrammdarstellungen für die SDA 8 Einbauten finden sich in *Abb. 27*. Auch hier schwanken Absorptionsgrade und Hohlraumgehalte am stärksten. Die Texturparameter sind hingegen entlang jeder Strecke recht ähnlich.

Der Schwerpunkt dieser Forschungsarbeit liegt auf dem Quervergleich verschiedener Einbauten des gleichen Belagstyps. Dabei sind die Einbauten jeweils durch Dutzende einzahliger Beobachtungsgrößen charakterisiert, welche überwiegend durch Mittelung von Beobachtungen entlang der Einbaustrecken entstanden sind. In den Tabellen *Tab. 11* bis *Tab. 13* ist die Varianz der akustischen Eigenschaften für die zwölf hier untersuchten Einbauten dokumentiert, die der bautechnischen Eigenschaften in *Tab. 15* und *Tab. 16*. Die relativen Standardabweichungen schwanken je nach Beobachtungsgröße erheblich. Grafische Darstellungen der relativen Standardabweichungen vom jeweiligen Mittelwert der Beobachtungsgrößen über alle Baustellen eines Belagstyps zeigen *Abb. 28* und *Abb. 29*. Wegen der besseren Übersichtlichkeit wurden die Beobachtungsgrößen auf jeweils zwei Diagramme verteilt. Die oberen Teilabbildungen zeigen die Standardabweichungen für die akustischen Parameter und die Baustellenbeobachtungen, die unteren Teilabbildungen präsentieren die bautechnischen Ergebnisse der Baustoffprüflabore. Die Reihenfolge der dargestellten Beobachtungsparameter entspricht derjenigen in *Tab. 18*, ausgelassen wurden die deskriptiven Parameter wie etwa Baufirma oder Mischwerk, deren Standardabweichung nicht aussagekräftig ist. Ein „D“ vor der Beschreibung der Beobachtungsvariablen in *Abb. 28* und *Abb. 29* zeigt eine Art von Differenzwert an, so steht *DCPXP* für die Standardabweichung der *CPXP*-Pegel entlang einer Messstrecke. Die entsprechende Säule im Diagramm zeigt die Standardabweichung dieser Standardabweichungen über die verschiedenen Baustellen hinweg. Ähnlich verhält es sich beispielsweise bei dem Sieblinienparameter *DObenRms*, er beschreibt die mittlere quadratische Abweichung der jeweiligen Sieblinie von der oberen Grenzkurve nach SNR 640 436. Die Säulen in *Abb. 28* und *Abb. 29* dokumentieren seine Standardabweichung über die Baustellen hinweg.



**Abb. 26** Variabilität ausgewählter Beobachtungsgrößen entlang der SDA 4 Einbaustrecken; maximaler Absorptionsgrad (oben), RMS-Wert der Textur (mittig oben), Gestaltfaktor  $g$  der Textur (mittig unten) und Hohlraumgehalt der Bohrkern nach Verfahren D (unten).



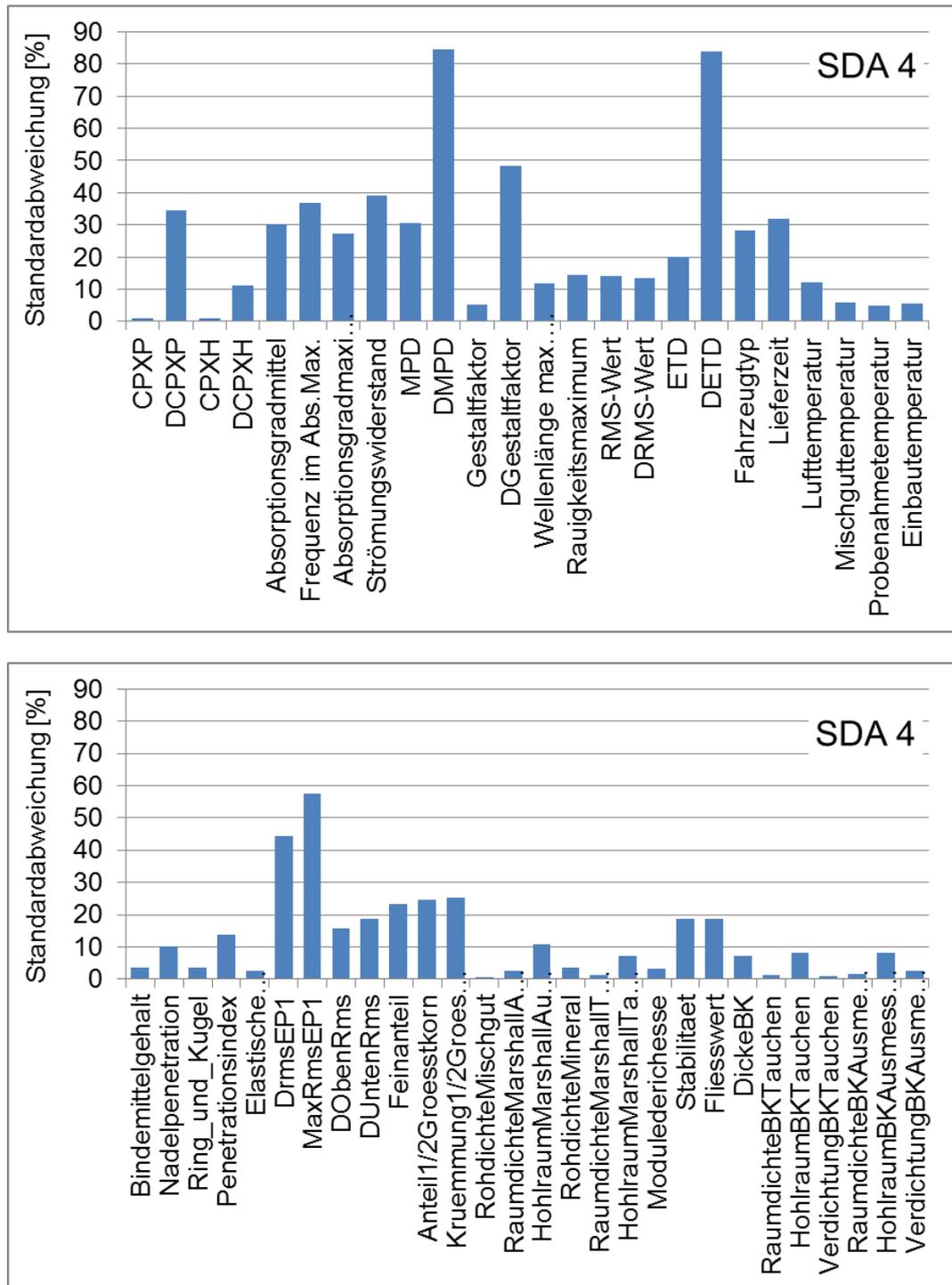
**Abb. 27** Variabilität ausgewählter Beobachtungsgrößen entlang der SDA 8 Einbaustrecken; maximaler Absorptionsgrad (oben), RMS-Wert der Textur (mittig oben), Gestaltfaktor  $g$  der Textur (mittig unten) und Hohlraumgehalt der Bohrkern nach Verfahren D (unten).

Die Standardabweichungen  $\sigma$  für die bautechnischen Parameter liegen beim SDA 8 zwischen 0.3 und 25.3 Prozent und für den SDA 4 zwischen 0.6 und 57.4 Prozent, wobei Werte über 20 Prozent nur bei den Kennwerten für die Sieblinien auftauchen. Allgemein

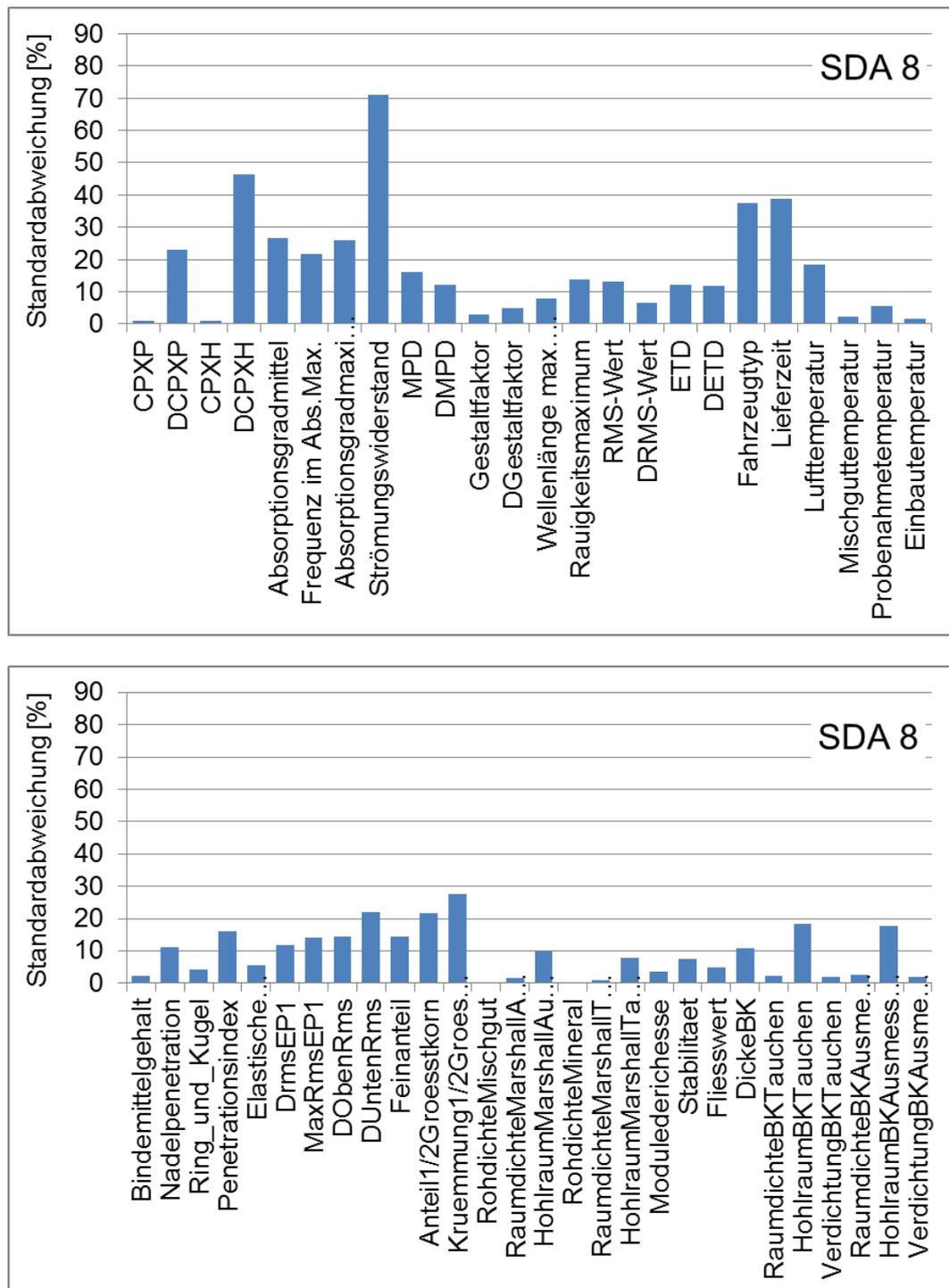
ist die relative Schwankungsbreite bei den bautechnischen Parametern beim SDA 4 deutlich höher als beim SDA 8. Jeweils recht hohe Standardabweichungen gibt es bei den Hohlraumgehalten, die bei den SDA 8 knapp unter 20 Prozent und bei den SDA 4 knapp unter 10 Prozent liegen. Umgekehrt schwanken Fließwert und Stabilität stärker beim SDA 4 als beim SDA 8.

Bezogen auf den CPX-Pegel, d.h. auf ein logarithmisches Mass, liegen die Standardabweichungen vom mittleren Pegel auf einem Belagstyp bei nur wenigen Prozentpunkten. Die physikalische Messgrösse bei CPX-Messungen ist aber der Schalldruck, die auf beiden Belägen beobachtete Spanne von 2.5 dB(A) entspricht beim Schalldruck einem Faktor von gut 1.3, d.h. einer ähnlichen Grössenordnung wie bei den meisten bautechnischen Parametern. Die Textureigenschaften der Deckschichten sind tendenziell etwas homogener als die bautechnischen Parameter mit typischen Standardabweichungen unter 15 Prozent je Bauweise. Höhere Standardabweichungen wie hier beim SDA 4 resultieren aus lokalen Inhomogenitäten, wie vor allem in Küttigen, wo an zwei gegenüberliegenden Messpunkten die Textureigenschaften viel schlechter sind als zu erwarten wäre. Strömungswiderstand und Absorptionsgrad weisen unter den akustischen Kenngrössen die grössten Varianzen auf. Für den Absorptionsgrad liegt die Spanne beim SDA 4 bei mehr als einem Faktor 2, die Standardabweichungen betragen zwischen 20 und 30 Prozent, beim SDA 8 ist es etwas weniger. Der Absorptionsgrad reagiert empfindlich selbst auf geringfügige Veränderungen des Hohlraums, wie sich beispielsweise bei Labormessungen während des Trocknungsvorgangs von Asphaltbohrkernen gezeigt hat [20]. Der Strömungswiderstand weist immer besonders grosse Variabilität auf, hier mit Standardabweichungen über 70 Prozent. Bei der Beurteilung des Strömungswiderstands kommt es eher auf die Grössenordnung an.

Als Schlussfolgerung ergibt sich, dass moderate Veränderungen an bautechnischen Parametern teilweise erhebliche Auswirkungen auf die Grössenordnung einzelner akustischer Parameter haben können. Bei der akustischen Bewertung muss aber immer die Gesamtheit an Kennzahlen betrachtet werden. Die bautechnischen Parameter schwanken insgesamt nur moderat, aber die akustisch relevanteste Grösse *Hohlraumgehalt* weist durchgängig hohe Standardabweichungen auf, besonders beim SDA 8.



**Abb. 28** Relative Standardabweichungen vom jeweiligen Mittelwert über alle Baustellen des gleichen Belagstyps für die SDA 4 Einbauten. Gezeigt sind akustische Parameter und Baustellenbeobachtungen (oben) sowie bautechnische Ergebnisse des Baustoffprüflabors (unten).



**Abb. 29** Relative Standardabweichungen vom jeweiligen Mittelwert über alle Baustellen des gleichen Belagstyps für die SDA 8 Einbauten. Gezeigt sind akustische Parameter und Baustellenbeobachtungen (oben) sowie bautechnische Ergebnisse des Baustoffprüflabors (unten).



## 3 Zusammenhänge zwischen bautechnischen und akustischen Daten

Unter den in dieser Forschungsarbeit bestimmten Untersuchungsparametern gibt es teilweise einen physikalisch begründeten Zusammenhang. Dies gilt einerseits für die Gruppen von akustisch gemessenen Parametern, Fahrbahnoberflächenparametern aus den in situ Messungen und baustofftechnischen Kennwerten untereinander, andererseits aber auch zwischen bestimmten Parametern aus diesen Gruppen. So geht beispielsweise ein breites akustisches Absorptionsgradspektrum mit einem höheren Strömungswiderstand einher und hohe MPD-Texturwerte kombiniert mit niedrigen  $CPX_H$ -Pegeln implizieren einen höheren Absorptionsgrad. Hohlraumgehalte von Marshallprobekörpern und Bohrkerne sind offensichtlich miteinander über Einbauparameter wie das Walzregime und die damit einhergehende Verdichtung verbunden.

In einigen Fällen ist ein physikalischer Zusammenhang eventuell nicht unmittelbar ersichtlich, könnte sich aber empirisch ergeben. Dazu ist eine statistische Analyse der Zusammenhänge notwendig. Aufgrund der hier untersuchten recht kleinen Stichprobe von nur zwölf Einbauten waren zuverlässige empirische Gleichungen eher nicht zu erwarten, aber qualitativ sollten sich Zusammenhänge erkennen lassen. Eine statistische Korrelationsanalyse ist wenig aussichtsreich, wenn ein Parameter über die gesamte Stichprobe von Einbauten hinweg kaum variiert, wie das bei einigen bautechnische Parametern der Fall ist, bei welchen die Standardabweichung nur wenige Prozentpunkte beträgt (siehe *Tab. 15* und *Tab. 16*, *Abb. 28* und *Abb. 29*).

### 3.1 Rollgeräuscentstehung und Anforderungen an lärmarme Deckschichten

Wenn ein Fahrzeugreifen über eine raue Strassenoberfläche rollt, so wirken in der Kontaktfläche lokale tangentielle und radiale Kräfte auf die Reifenlaufläche, die daraufhin lokal deformiert wird und sich beim Weiterrollen wieder entlastet. Die Rollbewegung führt zu einer zeitabhängigen Kraftanregung der Laufläche und der Profilklotze und fördert das Auftreten von Eigenschwingungen des Reifens. Die Reifenschwingungen werden teilweise an die Umgebung als Luftschall übertragen, wodurch der mechanisch induzierte Anteil des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs entsteht.

Einen weiteren Geräuscentstehungsmechanismus stellen Luftströmungsvorgänge im Reifen-Fahrbahn-Kontakt dar, die bislang als "air pumping" bezeichnet werden. Darunter versteht man den sich zeitlich verändernden Volumenfluss von Luft aus kleinen Volumina zwischen Reifen- und Fahrbahnoberfläche, die geschlossen oder geöffnet werden. Die Beschleunigung der Luft führt zur aerodynamischen Entstehung von Schall. Auch das Eindringen von Rauigkeitsspitzen der Fahrbahnoberfläche in die Laufläche des Reifens ist Ursache für die Entstehung aerodynamischer Geräusche. Es verändert die Querschnitte der von Luft durchströmten Kanäle im Reifen-Fahrbahn-Kontakt. Durch permanente zeitliche Veränderung des verdrängten Luftvolumens während des Rollvorgangs kommt es zur Beschleunigung der Luft in diesen Kanälen und zur Geräuscentstehung. Beide Mechanismen führen zum aerodynamisch induzierten Anteil des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs. Bei dichten Fahrbahnbelägen sorgen hohe texturinduzierte Strömungswiderstände im Reifen-Fahrbahn-Kontakt für eine Reduktion des aerodynamischen Anteils am Reifen-Fahrbahn-Geräusch.

Hohlraumreiche oder gar offenporige Beläge erlauben das Entlüften der Reifenkontaktzone in die Deckschicht hinein bei kleinen hohlrauminduzierten Strömungswiderständen, reduzieren aufgrund ihres Schallabsorptionsvermögens die Schallverstärkung durch den sogenannten Horneffekt des Schalltrichters zwischen Fahrbahnoberfläche und Reifen und schwächen damit das Reifen-Fahrbahn-Geräusch sowohl bei seiner Entstehung als auch bei der Ausbreitung aus der Kontaktzone und über die Strassenoberfläche hinweg.

Diese Geräuschenstehungsmechanismen gehen mit unterschiedlichen Potenzen der Fahrgeschwindigkeit  $v$  ein (Reifenschwingungen  $\sim v^2$ , aerodynamische Geräusche  $\sim v^4$  bis  $\sim v^6$ ). Bei tiefen Frequenzen unterhalb von 1'000 Hz dominiert der mechanisch induzierte Geräuschanteil, bei hohen Frequenzen oberhalb von 1'000 Hz der aerodynamisch induzierte.

Aufgrund dieser Betrachtungen zur Geräuschenstehung können Erwartungen an eine akustisch möglichst günstige Fahrbahndeckschicht formuliert werden. Das Ziel muss sein, die mechanische Anregung klein zu halten und – solange es sich um hohlraumreiche Deckschichten handelt – dabei möglichst viel Luft in die Deckschicht zu befördern und durch ein gutes Schallabsorptionsvermögen die entstehende Schallenergie zu mindern, d.h.:

1. Die Oberfläche sollte möglichst feinrau sein, damit die mechanische Anregung des Reifens schwach bleibt. Feinraue Oberflächen erfordern ein *kleines Grösstkorn* im Mischgut und einen hohen Fein- und Bindemittelanteil, um die Lücken zwischen den grössten Körnern gut zu schliessen.
2. Die Oberflächentextur sollte so gestaltet sein, dass die Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn möglichst gross ist und sich die Gesamtkraft damit auf eine grössere Anzahl von dann kleineren lokalen Kräften mit entsprechend kleinerer lokaler Anregung verteilt. Diese Forderung favorisiert eine ausgewogene Korngrössenverteilung mit einem hohen Texturgestaltfaktor und ein gut kontrolliertes Walzen beim Einbau.
3. Die Deckschicht sollte ein möglichst grosses Hohlraumvolumen für die strömende Luft zur Verfügung stellen. Der von oben zugängliche und miteinander verbundene Hohlraum sollte ein möglichst grosses Volumen aufweisen, um auch eine starke Schallabsorption zu ermöglichen. Dies spricht für grössere Körner und eher geringen Fein- und Bindemittelanteil.
4. Damit die strömende Luft überhaupt in den Hohlraum der Deckschicht gesogen und gepresst werden kann darf der Strömungswiderstand einerseits nicht zu gering sein, damit sich Druckdifferenzen überhaupt aufbauen können, andererseits darf er nicht zu hoch sein, da die Kräfte sonst nicht ausreichen, ein hinreichendes Luftvolumen in die Deckschicht zu befördern. Dieser Punkt spricht für eher feinraue Oberflächen mit grossen und verwinkelten oder kleinen und geometrisch einfachen Verbindungskanälen, welche einen zusammenhängenden Hohlraum bilden. Es wird also ein ausgewogenes Mischgut, kombiniert mit einem gut kontrollierten Einbau benötigt.
5. Akustisches Ziel des Einbaus ist auch ein im Frequenzbereich breitbandiges Schallabsorptionsspektrum mit hohem Schallabsorptionsgrad, wobei die Breite des Spektrums mit abnehmendem hohlrauminduzierten Strömungswiderstand abnimmt, die Höhe des Absorptionsmaximums mit dem zugänglichen Hohlraumgehalt ansteigt und die Position des Maximums entlang der Frequenzachse mit wachsender Schichtdicke zu tieferen Frequenzen wandert. Auch unter diesem Aspekt ist ein grosses Hohlraumvolumen mit verbundenen Poren gefragt, was in der derzeitigen Baupraxis auf grosse Körner und niedrigen Feinanteil in der Korngrössenverteilung hinausläuft.

Diese Liste enthält teilweise sich widersprechende Anforderungen aus akustischer Sicht, die sich nur in Form eines Kompromisses miteinander vereinbaren lassen. Weitere Kompromisse sind in Bezug auf nicht-akustische Anforderungen notwendig, etwa für die mechanische Dauerhaftigkeit, Verkehrssicherheit usw.

## 3.2 Empirische Zusammenhänge

Die Beobachtungs- und Messwerte aus den Tabellen *Tab. 11*, *Tab. 12*, *Tab. 13*, *Tab. 15* und *Tab. 16* bedürfen einer näheren Untersuchung. Insbesondere soll herausgefunden werden, welche der Beobachtungen im Hinblick auf die akustischen und bautechnischen Eigenschaften der Deckschichten besonders aussagekräftig sind. Dazu werden empirische Zusammenhänge aufgrund von statistischen Verfahren gesucht. *Tab. 18* listet die Untersuchungsparameter nochmals auf. Dort ist jedem einzelnen Parameter eine Nummer zugewiesen, die in den nachfolgenden Darstellungen zum einfachen Verweis auf die zugehörige Grösse verwandt wird. Es handelt sich um 56 Beobachtungsparameter, d.h. 1'540 (=56\*55/2) verschiedene Parameterkombinationen sind für jeden Einbau zu be-

trachten, für die 12 Einbauten also insgesamt bis zu 18'480, von wenigen fehlenden Kennwerten einmal abgesehen.

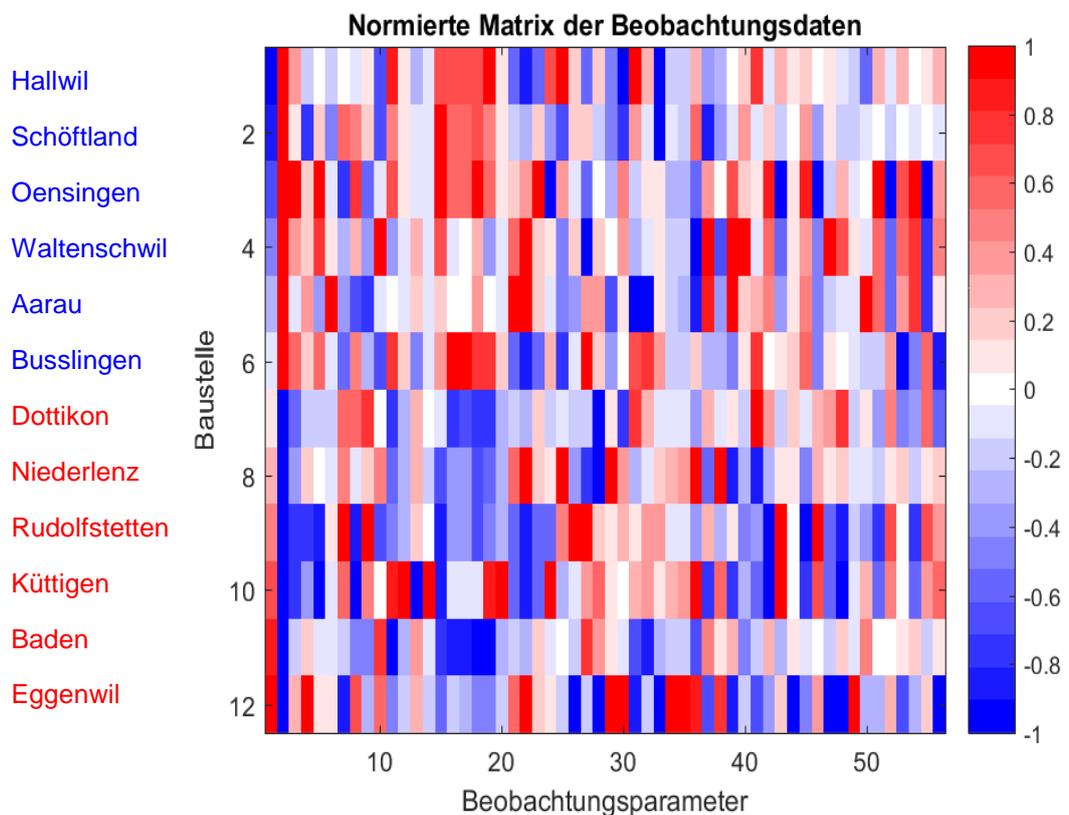
**Tab. 18** Beobachtungsparameter für die statistische Analyse.

<b>Baustelle und CPX</b>	<b>Nr.</b>	<b>Bindemittel</b>	<b>Nr.</b>
Baustellenort	1	Bindemittelgehalt, M.-%	29
Typ der Deckschicht	2	Nadelpenetration, 0.1 mm	30
CPXP, dB(A)	3	Erweichungspunkt RuK, °C	31
Standardabw. CPXP, $\sigma_{CPXP}$ , dB(A)	4	Penetrationsindex <i>PI</i>	32
CPXH, dB(A)	5	El. Rückstellung bei mm 200, %	33
Standardabw. CPXH, $\sigma_{CPXH}$ , dB(A)	6	<b>Marshallprobekörper</b>	<b>Nr.</b>
		Mittl. quadr. Abw. von der EP1 Korngrössenverteilung, %	34
<b>in situ</b>	<b>Nr.</b>		
Spektraler Mittelwert des Schallabsorptionsgrads $\alpha$	7	Max. Abweichung von der EP 1 Korngrössenverteilung, %	35
Terzfrequenz im Absorptionsgradmaximum, Hz	8	Mittl. quadr. Abw. von der oberen Grenzkurve SNR 640 436, %	36
Maximalwert des Schallabsorptionsgrads im Spektrum, $\alpha_{max}$	9	Mittl. quadr. Abw. von der unteren Grenzkurve SNR 640 436, %	37
Strömungswiderstand, $R_S$ , Pa s/m	10	Feinanteil, %	38
Mean Profile Depth, <i>MPD</i> , mm	11	Akkumulierter Wert der Kornanteile bis zum halben Grösstkorn, %	39
Standardabw. <i>MPD</i> , $\sigma_{MPD}$ , mm	12	Krümmung der Sieblinie bei halbem Grösstkorn, %/mm <sup>2</sup>	40
Gestaltfaktor, <i>g</i> , %	13	Rohdichte Mischgut, $\rho_m$ , kg/m <sup>3</sup>	41
Standardabweichung <i>g</i> , $\sigma_g$ , %	14	Raumdichte bei Ausmessen nach Verfahren D, $\rho_b$ , kg/m <sup>3</sup>	42
Wellenlänge des Rauigkeitsmaximums, $\lambda_{max}$ , mm	15	Hohlraumgehalt VM Verfahren D, Vol.-%	43
Maximalwert der Rauigkeitstiefe im Wellenlängenspektrum, $R_{eff.,max}$ , $\mu$ m	16	Rohdichte Mineral, berechnet, $\rho_{min}$ , kg/m <sup>3</sup>	44
Textur Root Mean Square, <i>RMS</i> , mm	17	Raumdichte Tauchw. Verfahren B, $\rho_b$ , kg/m <sup>3</sup>	45
Standardabweichung <i>RMS</i> , $\sigma_{RMS}$ , mm	18	Hohlraumgehalt VM Verfahren B, Vol.-%	46
Estimated Profile Depth, <i>ETD</i> , mm	19	Module de richesse	47
Standardabweichung <i>ETD</i> , $\sigma_{ETD}$ , mm	20	Stabilität, <i>S</i> , kN	48
<b>Baubeobachtungen</b>	<b>Nr.</b>	tangentialer Fließwert, <i>F<sub>t</sub></i> , mm	49
Baufirma	21	<b>Bohrkerne</b>	<b>Nr.</b>
Asphaltmischwerk	22	Schichtdicke, <i>d</i> , mm	50
Lieferfahrzeugtyp	23	Raumdichte Verfahren B, $\rho_b$ , kg/m <sup>3</sup>	51
Lieferzeit, min	24	Hohlraumgehalt Verfahren B, %	52
Lufttemperatur beim Einbau, °C	25	Verdichtungsgrad Verfahren B, %	53
Mischguttemperatur Anlieferung, °C	26	Raumdichte Verfahren D, $\rho_b$ , kg/m <sup>3</sup>	54
Mischguttemperatur Probenahme, °C	27	Hohlraumgehalt Verfahren D, %	55
Einbautemperatur, °C	28	Verdichtungsgrad Verfahren D, %	56

Um die Messdaten und Beobachtungen numerisch auswerten zu können, müssen die teils rein qualitativen Beobachtungen (z.B. „Mischgutlieferung mit Silo-Lastwagen“) in Zahlenwerte umgesetzt werden und die beteiligten, völlig unterschiedlichen physikali-

schen Grössen werden jeweils auf ein Bezugsniveau normiert. Die resultierende Beobachtungsmatrix wird dann einer Korrelationsanalyse unterzogen, um herauszufinden welche Beobachtungsgrössen besonders signifikant sind und wie sie mit anderen Beobachtungsgrössen statistisch zusammenhängen. Details zur Normierung und zum Vorgehen bei der statistischen Analyse stehen im Anhang IV. An dieser Stelle liegt der Fokus auf den Resultaten dieser Analyse.

Nach der Normierung liegen alle Beobachtungsvariablen in einem Bereich von -1 bis +1. In *Abb. 30* sind auf der Abszisse 56 Beobachtungswerte gegen die zwölf Einbauten aufgetragen. Ein hoher Wert ist rot, ein niedriger blau, weiss steht für den Mittelwert null. Ein visueller Vergleich der Zeilen dieser Matrix zeigt schon gewisse Gemeinsamkeiten von Baustellen. Die sechs SDA 8 Einbauten (obere sechs Zeilen) heben sich von den SDA 4 Einbauten (untere sechs Zeilen) als Gruppe ab, besonders deutlich bei den Texturparametern (Nummern 11 bis 20). Aber auch über die Belagsklassen hinweg lassen sich interessante Beobachtungen machen. Einbauten Nr. 2 und 11 stellen sich z.B. in recht besserer Farbgebung dar, d.h. die Beobachtungsparameter enthalten wenige Extremwerte, weshalb man die Einbauten damit als vergleichsweise ausgewogen betrachten kann.



**Abb. 30** Normierte Messdaten und Beobachtungswerte für alle zwölf Einbauten, blau geschriebene Ortsnamen beziehen sich auf SDA 8 Einbauten, rote auf SDA 4.

Neben der visuellen Analyse sind die normierten Einbaubeobachtungen von *Abb. 30* auch geeignet für eine mathematisch-statistische Analyse, um zu erkennen welche Beobachtungsgrössen besonders aussagekräftig sind und mit welchen Beobachtungsparameter sie jeweils eng zusammenhängen. Dazu werden die Daten aus *Abb. 30* mathematisch als Matrix aufgefasst und die Beziehungen zwischen den Matrixelementen mittels Kovarianzanalyse untersucht [15][16]. Details zu diesen Berechnungen und ihrer Interpretation stehen im Anhang IV.

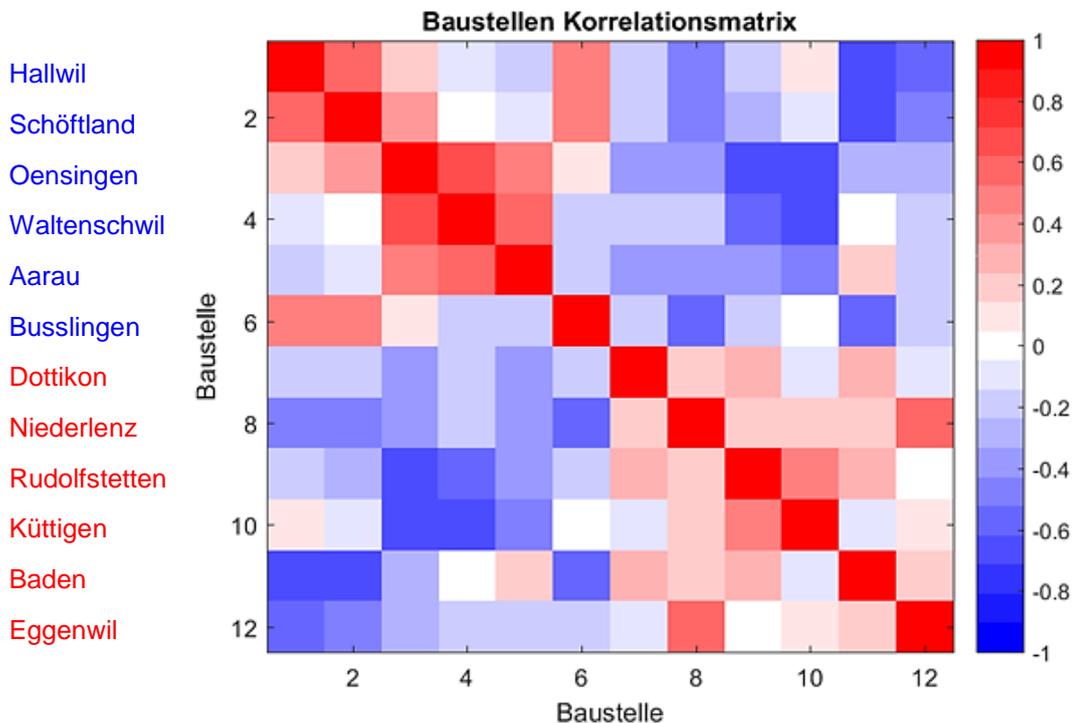
Die Kovarianzanalyse liefert zwei verschiedene Korrelationsmatrizen, zum einen eine „Baustellenkorrelationsmatrix“ (eine 12x12-Matrix, die die Ähnlichkeit der Baustellen über alle Beobachtungen hinweg darstellt) und zum anderen eine „Parameterkorrelations-

matrix“ (56x56-Matrix, die die Ähnlichkeit der einzelnen Beobachtungen aus *Tab. 18* über alle Baustellen hinweg darstellt). Die Werte der Matrixelemente  $c_{ij}$  liegen immer zwischen -1 und +1, wobei positive Werte (positive Korrelation, rot) bedeutet, dass hohe Werte der Parameter in Zeile  $i$  mit hohen Werten in Spalte  $j$  einhergehen, während eine negative Korrelation hohe Werte des einen Parameters mit niedrigen Werten des anderen Parameters verbindet (blau).

### 3.2.1 Baustellenkorrelationsmatrix

Die 12x12 Baustellenkorrelationsmatrix (*Abb. 31*) unterteilt sich in zwei Untermatrizen für die SDA 8 Beläge (oben links, blaue Ortsnamen) und die SDA 4 Deckschichten (unten rechts, rote Ortsnamen). Die Eigenschaften dieser Einbauten sind untereinander jeweils ähnlicher (je kräftiger das Rot, desto mehr) als unter den Belagseinbauten des jeweils anderen Belagstyps (Untermatrizen links unten und rechts oben).

Überdurchschnittliche Ähnlichkeiten gibt es zwischen den SDA 8 Einbauten 1, 2 und 6 auf der einen und zwischen 3, 4 und 5 auf der anderen Seite. Die Einbauten 1 und 6 wurden vom gleichen Mischwerk beliefert, wie auch die Einbauten 4 und 5. Bei den SDA 4 Einbauten zeigen sich höhere Korrelationen zum einen bei den Einbauten 9 und 10 und zum anderen bei 8 und 12. Auch bei diesen Paarbildungen lieferten jeweils die gleichen Mischwerke. Überdurchschnittlich hohe Ähnlichkeiten (positive Korrelationen) innerhalb eines Belagstyps gibt es tendenziell eher, wenn jeweils die gleichen Mischwerke und damit in der Regel auch die gleichen Baufirmen beteiligt waren. Da hier aber nicht die Einbauweisen bestimmter Firmen oder die Unterschiede der Mischgutzusammensetzungen bestimmter Mischwerke untersucht werden sollen, wird auf diese Aspekte hier nicht weiter eingegangen. Blau gefärbte Matrixelemente zeigen jeweils überwiegend gegensätzliche Eigenschaften an (z.B. besonders niedrige Hohlraumgehalte in Oensingen und besonders hohe in Rudolfstetten und Küttigen). Die SDA 4 Einbauten sind untereinander nur moderat ähnlich (blasses rot und weiss herrschen vor), aber im Gegensatz zu den SDA 8 Belägen gibt es insgesamt keine negativen Korrelationen, d.h. Blautöne wie bei Aarau-Hallwil.

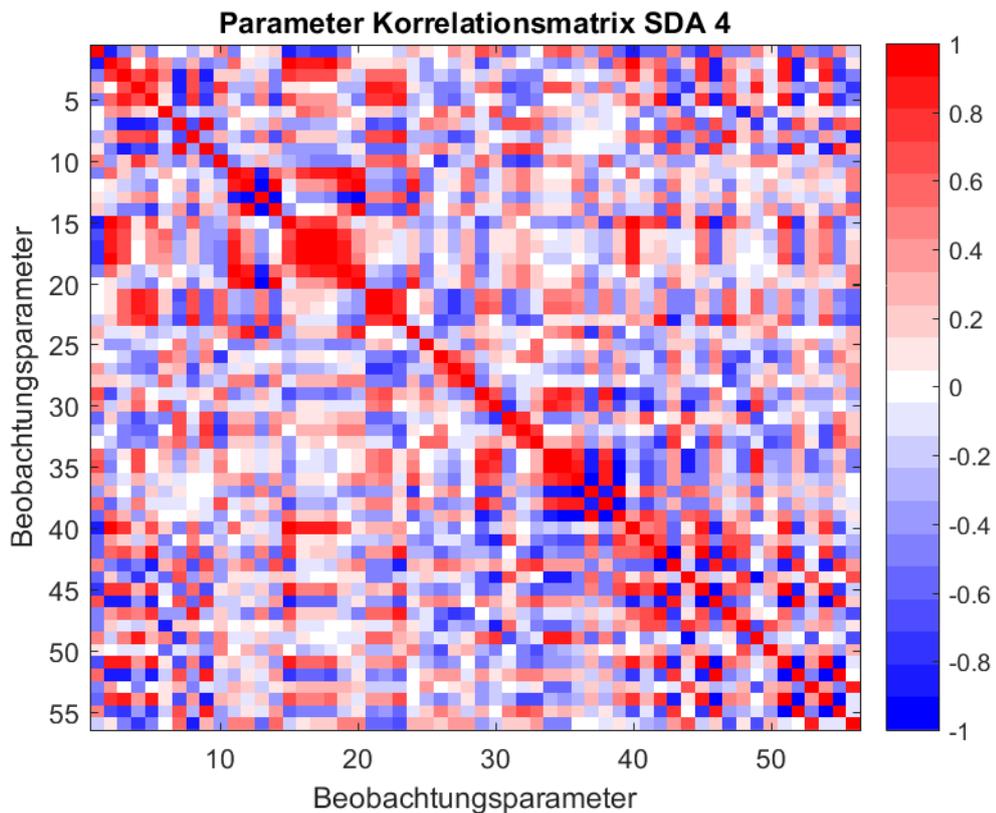


**Abb. 31** Baustellenkorrelationsmatrix mit SDA 8 Einbauten (blaue Ortsnamen) und SDA 4 Einbauten (rote Ortsnamen).

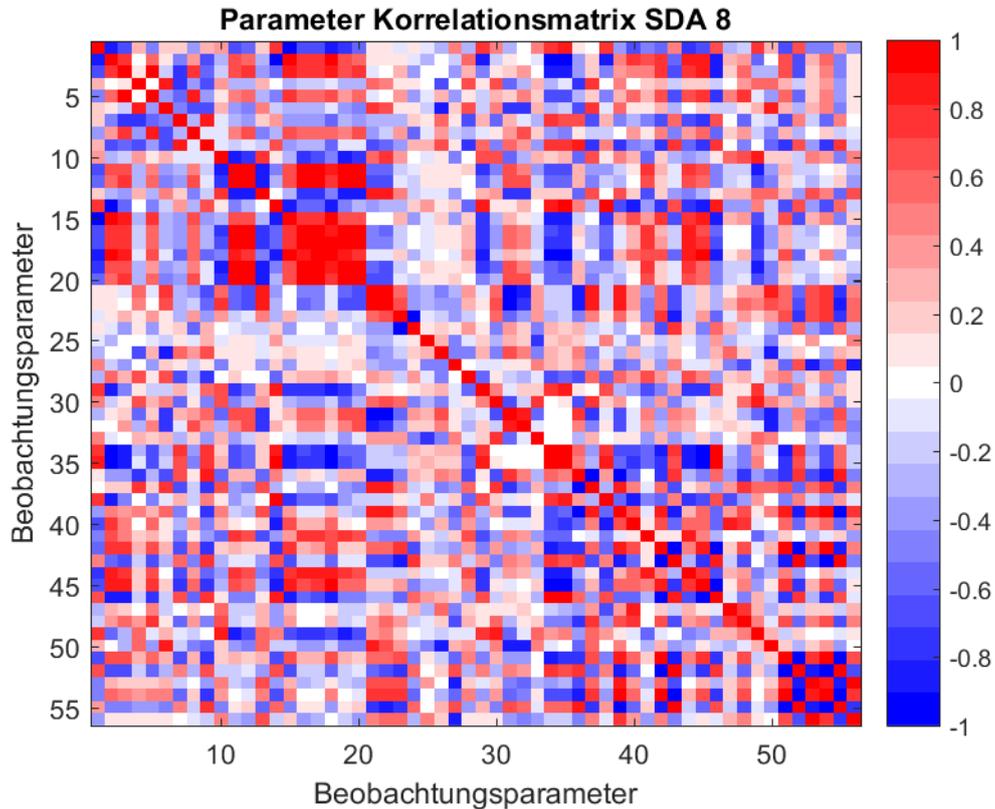
### 3.2.2 Parameterkorrelationsmatrix

Die visuell offensichtliche Unterteilung der Korrelationen in der Baustellenkorrelationsmatrix von *Abb. 31* in Untermatrizen für die beiden Belagstypen zeigt an, dass die meisten Beobachtungsparameter eine belagsspezifische Komponente enthalten, wie es ja auch zu erwarten ist. Daher ist es sinnvoll, die 56x56 Parameterkorrelationsmatrizen auch getrennt für beide Belagstypen SDA 4 und SDA 8 zu berechnen. Die Korrelationen werden dabei getrennt für den oberen Teil der Beobachtungsmatrix aus *Abb. 30* für den SDA 8 und den unteren Teil für den SDA 4 ausgewertet. Da die Anzahl der beteiligten Baustellen dabei nur noch jeweils sechs beträgt, ist theoretisch die statistische Unsicherheit grösser als wenn man alle Baustellen gleichzeitig miteinander vergleichen würde. Das Ergebnis dafür ist im Anhang IV gezeigt. Die bautechnische und physikalische Aussagekraft der Analyse steigt andererseits durch die belagsspezifische Auswertung.

Die Korrelationsmatrizen für die Belagstypen SDA 4 und SDA 8 (*Abb. 32* und *Abb. 33*) zeigen überwiegend Ähnlichkeiten in ihrer Struktur. Die Korrelation innerhalb von bestimmten Gruppen von Beobachtungsparametern ist jeweils ähnlich gut. Dies gilt z.B. für die Oberflächenrauigkeitsparameter (Nr. 15-20) oder die Bohrkernparameter (Nr. 51-56).



**Abb. 32** Parameterkorrelationsmatrix SDA 4.



**Abb. 33** Parameterkorrelationsmatrix SDA 8.

Aus den Matrizen von *Abb. 32* und *Abb. 33* lassen sich Hinweise ableiten, welche Parameter für eine weitere Untersuchung der statistischen Zusammenhänge zwischen Einbauparametern besonders interessant sind und welche weniger, etwa weil sie stark mit anderen weniger gut messbaren oder unsichereren Parametern korrelieren. Es interessieren vor allem die Beobachtungswerte in kräftigem Rot und Blau. Hier die wichtigsten Schlussfolgerungen aus den Korrelationsmatrizen mit kausalen Erklärungen für die beobachteten statistischen Zusammenhänge:

- **CPX-Messungen**

Der CPXP-Pegel korreliert sehr gut mit dem Belagstyp, der CPXH-Pegel gut und beide CPX-Pegel sehr gut untereinander. Sowohl CPXP als auch CPXH korrelieren positiv mit der Oberflächentextur ( $\lambda_{\max}$ ,  $R_{\text{eff,max}}$ ,  $RMS$ ,  $\Delta RMS$ ), der Wellenlänge im Absorptionsmaximum, dem Sieblinienanteil bis zum halben Grösstkorn, der Sieblinienkrümmung und der Raumdichte von Marshallprobekörper und Bohrkernen bzw. negativ mit den Hohlraumgehalten und dem mittleren und maximalen Absorptionsgrad sowie dem Feinanteil im Mischgut.

Erklärung: Starke Reifenanregung führt zu hohen CPX-Pegeln und wird durch raue und konvexe Oberflächen mit niedrigen Gestaltfaktoren  $g$  verursacht, weil die Kontaktflächen kleiner sind und damit die Kontaktkräfte höher ausfallen. Niedrige Gestaltfaktoren ergeben sich bei hohen Kornfraktionen des Grösstkorns oder schlechten Walzergebnissen. Hoher Hohlraumgehalt führt zu höherer Absorption und reduziert die Pegel.

- **Schallabsorption**

Höhere Schallabsorptionsmaxima gehen einher mit höherem Hohlraumgehalt und, der Korrelationsmatrix nach, auch mit höherem Bindemittelerweichungspunkt und niedrigerer Einbautemperatur. Letzteres kann darauf hindeuten, dass bei niedrigeren Einbautemperaturen per se die Verdichtung schlechter gelingt, wodurch sich der Hohlraumgehalt tendenziell erhöht. Höhere Schallabsorptionsmaxima korrelieren auch mit geringeren Raumdichten und erwartungsgemäss mit tieferen CPX-Pegeln. Der Zu-

sammenhang mit Hohlraumgehalt und Raumdichte ist bei Bohrkernen etwas deutlicher als bei Marshallprobekörpern, aber in jedem Fall ausgeprägt.

Erklärung: Die Schallabsorption erfolgt im zugänglichen und verbundenen Hohlraum, daher korreliert sie mit Parametern, die die Ausprägung des Hohlraums begünstigen.

- **Strömungswiderstand**

Ein hoher texturinduzierter Strömungswiderstand resultiert von einer feinrauen Oberfläche (negative Korrelation mit den meisten Texturparametern) und einem höheren Gestaltfaktor  $g$ . Ein höherer Strömungswiderstand geht tendenziell einher mit einem hohen Feinanteil (besonders beim SDA 4), Bindemittelgehalt, Nadelpenetration und Fließwert und mit niedrigeren Ring-und-Kugel Werten und Penetrationsindizes. Unter diesen Umständen lassen sich beim Einbau Gesteinskörner besser ins Bindemittel einbetten und Hohlräume dadurch besser schliessen. Die Korrelation mit Marshall- und Bohrkernparametern ist eher schwach.

Erklärung: Eine eher feinraue und konkave Oberfläche bietet weniger Volumen für den Luftstrom zwischen den Unebenheiten der Oberfläche, was den texturinduzierten Strömungswiderstand erhöht. Der hohlrauminduzierte Strömungswiderstand wächst je dichter der Belag ist, d.h. je höher der Fein- und Bindemittelanteil ist. Das Schliessen von Hohlräumen beim Einbau wird auch durch weiches und fließfähiges Bindemittel begünstigt. Die eher schwache Korrelation mit Bohrkernparametern spricht dafür, dass der hier gemessene Strömungswiderstand überwiegend durch die Oberflächen-textur und in geringerem Umfang durch die Hohlräume induziert ist.

- **Texturparameter**

Die Texturparameter sind fast alle untereinander deutlich positiv korreliert, nur der Gestaltfaktor führt tendenziell zu negativen Korrelationen. Demnach ist eine besonders raue Oberfläche tendenziell eher konvex geformt und damit akustisch ungünstiger. Eine raue Oberfläche geht einher mit höheren CPX-Pegeln, höherer Frequenz im Absorptionsgradmaximum aber niedrigerer Absorption, niedrigeren Gehalten an Bindemittel, leicht höheren Ring-und-Kugel Werten und Penetrationsindizes, kleinerem Feinanteil und etwas grösserer Krümmung der Sieblinie beim SDA 4.

Erklärung: Raue Texturen werden begünstigt durch höheren Anteil grosser Körner und niedrigerem Bindemittelgehalt. Raue Texturen und niedrige Gestaltfaktoren regen den fahrenden Reifen stärker zu Schwingungen an, was zu höheren CPX-Pegeln führt, unabhängig von Hohlraumgehalt und Schallabsorptionsgrad.

- **Baustellenparameter**

Die Baustellenparameter sind untereinander gut korreliert, denn Baufirma, Belagswerk und Art des Mischguttransportes sind überwiegend vertraglich miteinander verbunden. Längere Transportdauer korreliert nur beim SDA 4 mit höherer Heterogenität der Oberfläche und ungünstigeren Gestaltfaktoren, korreliert aber allgemein negativ mit der Transportmethode, z.B. werden Thermosilos bei insgesamt vier Fahrten eingesetzt, was auch die drei überhaupt längsten Strecken betrifft. Das Mischwerk korreliert mit Eigenschaften der Sieblinie und des Bindemittels und damit mittelbar mit Rohdichte und Hohlraumgehalt, aber auch mit Parametern der Oberflächentextur. Die CPX-Inhomogenität ist daher ebenfalls je nach Mischwerk mal grösser und mal kleiner. Bei den ursprünglich nicht-numerischen Baustellenparametern ist die zugewiesene Zahl beliebig, hier müsste man folglich über die Korrelation hinwegsehen, um etwa Mischwerke miteinander vergleichen zu können.

Erklärung: Baufirma, Mischwerk und Lieferbedingungen sind untereinander vertraglich geregelt. Gleiche Mischwerke liefern jeweils recht ähnliches Mischgut eines gewünschten Typs. Das paust sich dann durch auf die Eigenschaften des fertigen Belags.

- **Temperaturen**

Die Temperaturen des Mischguts, bei Probenahme und Einbau korrelieren untereinander beim SDA 4 gut, beim SDA 8 nur mässig. Beim SDA 4 finden sich positive Korrelationen mit dem Absorptionsgrad und leicht negative mit den CPX-Pegeln und dem module de richesse. Beim SDA 8 erscheinen die Korrelationen eher unsystematisch.

Erklärung: Die beobachteten Korrelationen erscheinen eher zufällig, u.a. weil die Temperaturmesswerte nahe beieinander lagen und nur sporadische Messungen erfolgten.

- **Bindemittel**

Bindemittelgehalt und Nadelpenetration sind untereinander eng positiv korreliert, letztere negativ mit dem Erweichungspunkt und dieser mit dem Penetrationsindex positiv. Ein hoher Bindemittelgehalt korreliert mit der Feinrauheit der Oberflächentextur beim SDA 4. Ein hoher Erweichungspunkt und Penetrationsindex geht mit hohen Werten für Absorption und Hohlraumgehalt sowie mit niedrigen Strömungswiderständen und Gestaltfaktoren einher.

Erklärung: Das Bindemittel kann bei den kleineren Körnern des SDA 4 die Oberfläche spürbar glätten. Ein hoher Erweichungspunkt erschwert die Verdichtung beim Einbau und begünstigt das Bestehen von Hohlräumen und damit die Absorption.

- **Sieblinie**

Ein Zusammenhang mit akustischen Eigenschaften ist für die EP1-Kurvenabweichung kaum erkennbar. Ein hoher Feinanteil begünstigt feinraue Oberflächen und hohe texturinduzierte Strömungswiderstände. Eine starke Krümmung der Sieblinie und ein hoher Anteil an grober Gesteinskörnung begünstigen raue Oberflächen und damit höhere CPX-Pegel und niedrigere Strömungswiderstände; damit einher gehen höhere Hohlraumgehalte und höhere Schallabsorptionsgrade. Diese Zusammenhänge mit den akustischen Eigenschaften sind beim SDA 4 stärker ausgeprägt als beim SDA 8, welcher dafür deutlicher mit Rohdichte und Hohlraumgehalt zusammenhängt.

Erklärung: Die Sieblinie ist wesentlich für die Kornstruktur der fertigen Deckschicht verantwortlich und damit für die Oberflächentextur und den Hohlraumgehalt. Insbesondere der Anteil der grossen Körner prägt Rauheit und Hohlraumgehalt und damit die Reifenanregung, den textur-induzierten Strömungswiderstand und die Schallabsorption. Ein hoher Feinanteil ist akustisch günstig, weil er zu feinraueren Oberflächen führt. Die EP1-Sieblinie ist aus akustischer Sicht nicht besonders günstig.

- **Marshallprobekörper**

Die Rohdichte des Mischguts korreliert insgesamt eher schwach, am ehesten noch mit rauer Oberfläche und hohen CPX-Pegeln. Dichte und Hohlraumgehalt des Marshallprobekörpers korrelieren jeweils hoch und negativ miteinander und bei Messverfahren D und B in gleicher Weise. Auch die Korrelation zu den entsprechenden Bohrkernwerten ist sehr ausgeprägt. Ein hoher Hohlraumgehalt führt zu hoher Absorption und hängt mit einem etwas höheren Penetrationsindex und längeren Lieferzeiten zusammen. Negativ korreliert der Hohlraumgehalt des Marshallprobekörpers mit den CPX-Pegeln, der Wellenlänge des Absorptionsmaximums und mit Mischgutanlieferung per Lade. Mit höherem module de richesse nehmen CPX-Pegel und Frequenz im Absorptionsmaximum zu (deutlicher beim SDA 4) bei stärkerer Krümmung der Siebkurve. Die Marshallprobekörperstabilität wächst mit elastischer Rückstellung und module de richesse und geht mit höheren CPX-Pegeln einher, letzteres nur beim SDA 4. Der Fließwert korreliert positiv mit Nadelpenetration und eher feinrauen Oberflächen, beim SDA 4 auch negativ mit der Verdichtung und der Absorption.

Erklärung: Die Dichten und Hohlraumgehalte der Marshallprobekörper bilden sich auf die Bohrkerne und CPX-Pegel ab und lassen sich durch die Sieblinien erklären. Die höheren CPX-Pegel bei höheren Werten von Stabilität und module de richesse sind möglicherweise zufällig.

- **Bohrkerne**

Eine dickere Deckschicht ist verbunden mit inhomogeneren CPX-Pegeln, etwas erhöhtem Strömungswiderstand, niedrigerem Schallabsorptionsgrad und niedrigerer Frequenz im Absorptionsmaximum. Die Bohrkernuntersuchungsergebnisse sind in sich sehr konsistent. Hohe Raumdichte geht mit eher hoher Verdichtung und niedrigem Hohlraumgehalt einher. Ein hoher Hohlraumgehalt führt zu niedrigen CPX-Pegeln, hoher Absorption, niedrigen Strömungswiderständen, hohen Ring und Kugel Werten und Penetrationsindizes und hängt auch vom Mischwerk ab.

Erklärung: Der höhere Hohlraumgehalt in den Bohrkerne stellt dem Luftschall ein grösseres Volumen für die Absorption zur Verfügung was zu niedrigeren CPX-Pegeln führt. Aufgrund dieses eindeutigen Zusammenhangs ist davon auszugehen, dass die Hohlräume in den hier untersuchten Bohrkernen mehrheitlich auch zugänglich waren. Die Schichtdicke tritt dahinter in der Bedeutung klar zurück.

### 3.2.3 Ausgewählte Beobachtungsparameter

Ausgewählte Beobachtungsparameter sollen hier im Hinblick auf ihre gegenseitigen Abhängigkeiten genauer untersucht und dargestellt werden. Parameterkombinationen die gut korrelieren, d.h. sich in der Korrelationsmatrix durch kräftige Färbung hervorheben, sind grundsätzlich interessant. Wichtig ist aber auch, dass über das Ensemble der Beobachtungswerte einer bestimmten Grösse hinweg eine ausreichende Varianz besteht und man dadurch die Gefahr reduziert, Zufallskorrelationen zu interpretieren. Zum Beispiel zeigt der Bindemittelgehalt der SDA 4 Einbauten in der Korrelationsmatrix z.T. klare Korrelationen an (*Abb. 32*, Spalte 29), die Standardabweichung über alle sechs Einbauten hinweg liegt aber nur bei gut 3 % (*Tab. 15*), beim SDA 8 liegt sie sogar noch niedriger (*Tab. 16*). Die Bindemittelkorrelationen sind damit unter Berücksichtigung von Messunsicherheiten mit Vorsicht zu interpretieren.

Unter Berücksichtigung der physikalischen Aussagekraft, der Eindeutigkeit der statistischen Korrelation, der Varianz der Beobachtungswerte und der Zielrichtung des Projekts wurden sieben Parameter für eine weitere Analyse ausgewählt (*Tab. 19*). Die Beziehungen dieser Parameter untereinander und mit anderen Beobachtungsvariablen erscheinen besonders gut geeignet, akustische und bautechnische Zusammenhänge aufzuzeigen.

**Tab. 19** Ausgewählte und als besonders aussagefähig betrachtete Parameter.

Klassifizierung	Parameter
Akustische Messwerte	CPXP
Oberflächeneigenschaften	Texturgestaltfaktor und Textureffektivwert, maximaler Absorptionsgrad, Strömungswiderstand
Marshallprobekörper	Akkumulierter Kornanteil bei halbem Maximalkorn
Bohrkerne	Hohlraumgehalt Ausmessverfahren

In den nachfolgenden Darstellungen (*Abb. 34* bis *Abb. 37*) sind SDA 8 Einbauten mit blauen Symbolen gekennzeichnet, SDA 4 Einbauten durch rote Symbole. Es werden jeweils die ausgewählten Beobachtungsgrößen gegeneinander aufgetragen.

Aus *Abb. 34*, die Abhängigkeiten der CPXP-Pegel aufzeigt, folgt:

- CPXP korreliert sehr gut mit CPXH und kann daher als Proxy für die zu erwartenden Lärmpegel dienen.
- Auf SDA 4 gehen mit höheren CPXP-Pegeln auch höhere Pegelvarianzen einher, auf SDA 8 gibt es diesen Zusammenhang nicht. Die akustische Reproduzierbarkeit von SDA 8 scheint also besser zu sein.
- Höhere Effektivwerte der Oberflächentextur gehen mit höheren CPX-Pegeln einher, die SDA 8 Werte sind jeweils höher als die SDA 4 Werte.
- Höhere Gestaltfaktoren reduzieren auf SDA 8 die CPX-Pegel, auf SDA 4 sind die Gestaltfaktoren höher und zu nah beieinander, um einen Trend zu ergeben.
- CPXP sinkt mit zunehmenden Hohlraumgehalten für SDA 4, beim SDA 8 ist dieser Zusammenhang weniger deutlich.
- Eine klare Korrelation zwischen CPX-Pegel und Einbautemperatur ist nicht zu erkennen

Aus *Abb. 35*, die Abhängigkeiten von Absorptionsgrad und Strömungswiderstand aufzeigt, folgt:

- Je höher der Schallabsorptionsgrad, desto leiser das Reifen-Fahrbahn-Geräusch (die vorliegende Analyse bestätigt damit das Vorwissen).
- Beim SDA 4 nimmt der Strömungswiderstand mit dem CPX-Pegel zu, beim SDA 8 ergibt sich kein klarer Trend.

- Je höher der Hohlraumgehalt, desto höher der Schallabsorptionsgrad (die vorliegende Analyse bestätigt damit das Vorwissen).
- Für den SDA 8 gilt: Je höher der akkumulierte Anteil bei halbem Grösstkorn, desto kleiner die Absorption, weil weniger Hohlraumvolumen für die grössten Körner übrig bleibt. Beim SDA 4 ist kein Trend erkennbar.
- Je höher der Feinanteil im Mischgut, desto höher der Strömungswiderstand. Der Feinanteil führt sowohl zu feinraueren Oberflächen als auch zu engeren Hohlraumnetzwerken.
- Eine rauere Oberfläche reduziert den (texturinduzierten) Strömungswiderstand.

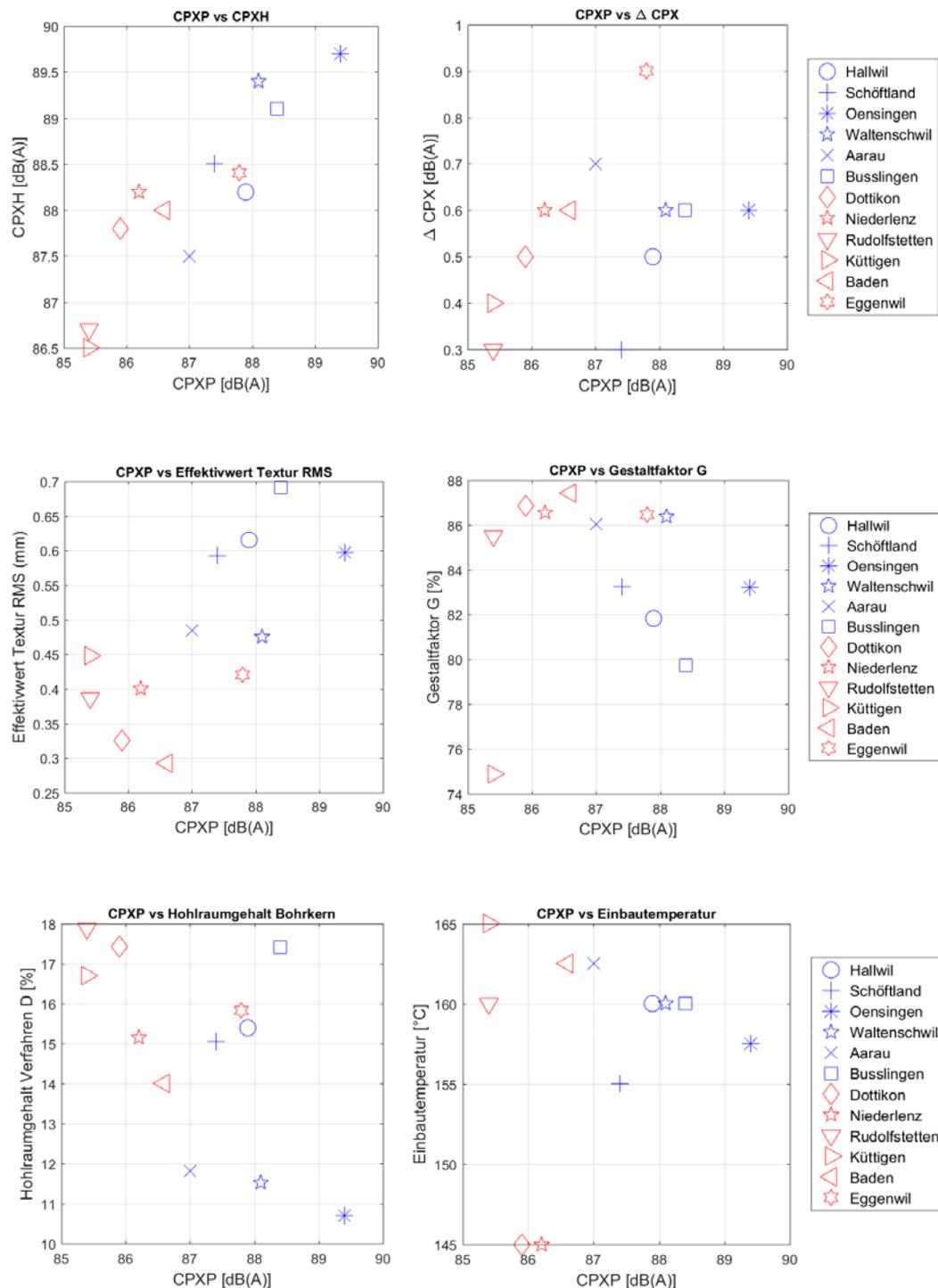
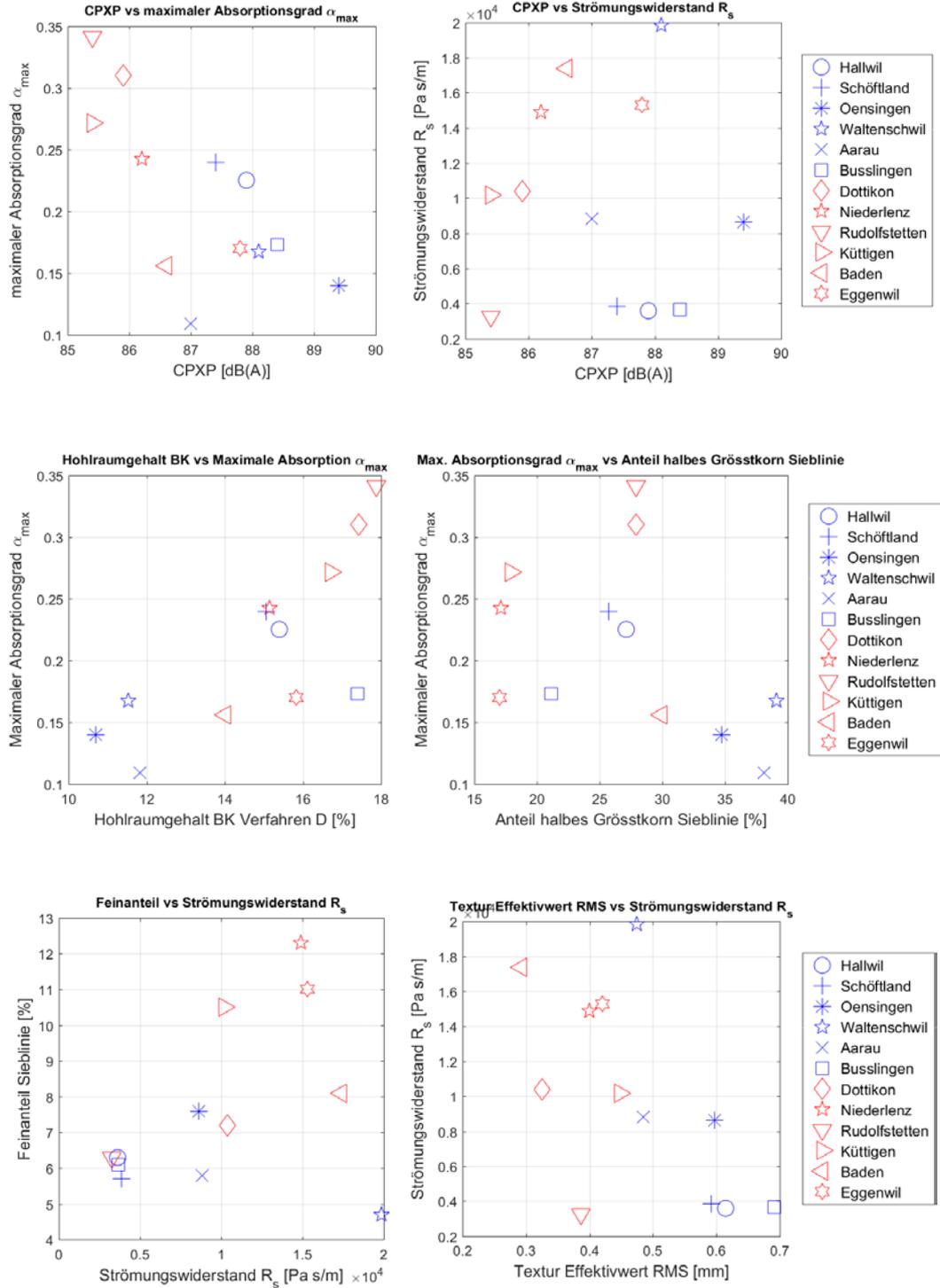


Abb. 34 Abhängigkeiten des Parameters CPXP von anderen Parametern.



**Abb. 35** Abhängigkeiten von maximalem Absorptionsgrad  $\alpha_{max}$  und Strömungswiderstand  $R_s$ .

Aus *Abb. 36*, die Abhängigkeiten von Sieblinienparametern, Hohlraumgehalt, Absorptionsgrad und Verdichtung aufzeigt, folgt:

- Je höher der akkumulierte Anteil bei halbem Grösstkorn, desto niedriger der CPX-Pegel, weil sich dann weniger raue Oberflächen ergeben.
- Je höher der akkumulierte Anteil bei halbem Grösstkorn, desto niedriger der Hohlraumgehalt, weil dann weniger Volumen für grosse Körner übrig bleibt.
- Die Gruppierung der SDA 4 Sieblinien in abknickende und eher stetige Kurven spiegelt sich im Krümmungsattribut wider, aber nicht im akkumulierten Sieblinienanteil bei halbem Grösstkorn. Beim SDA 8 ist die Krümmung vom Anteil bei halbem Grösstkorn weitgehend unabhängig.
- Eine höhere Verdichtung geht tendenziell mit einem niedrigeren Hohlraumgehalt und einem niedrigeren Absorptionsgrad einher (besser zu sehen beim SDA 8). Bei den wenig verdichteten und hohlraumreichen Belägen in Busslingen und Eggenwil ist die Absorption niedrig, d.h. die Hohlräume sind offensichtlich nicht gut miteinander verbunden bzw. kaum zugänglich.
- Der Hohlraumgehalt des Marshallprobekörpers paust sich mehrheitlich gut auf die Bohrkerne durch. Bei letzteren ist der Hohlraumgehalt etwa 2 % niedriger. Dieser Zusammenhang illustriert die Abhängigkeit zwischen fertigem Bauwerk und Baumaterial. Etwas aus dem Rahmen fallen die wenig verdichteten Deckschichten in Dottikon und Busslingen.

Aus *Abb. 37*, die Abhängigkeiten von Strömungswiderstand und Texturparametern aufzeigt, ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

- Die Rauheit der Oberfläche steigt mit abnehmendem Sieblinienanteil bei halbem Grösstkorn, d.h. mit zunehmendem Anteil grosser Körner, welche die Oberfläche aufrauen.
- Ein höherer Feinanteil im Mischgut führt beim SDA 4 zu weniger rauen Oberflächen, da die Lücken zwischen den grossen Körnern durch feinkörnige Materialanteile besser gefüllt werden. Beim SDA 8 kommt dieser Effekt nicht zum Tragen, wobei die Varianz im Feinanteil dort auch eher gering ist.
- Die Oberflächenrauheit nimmt mit der Krümmung der Sieblinie tendenziell zu, weil damit der Anteil grosser Körner wächst.
- Der Gestaltfaktor nimmt mit der Oberflächenrauheit ab, weil zunehmende Rauheit zu konvexeren („gebirgigeren“) Oberflächen führt. Beim SDA 4 besteht der Zusammenhang ebenfalls, wenngleich die Gestaltfaktoren nahe beieinander liegen (Ausnahme ist Küttigen, siehe auch *Abb. 26*).
- Ein höherer Gestaltfaktor erhöht den Strömungswiderstand. Dies ist der Fall, weil er zu einer feinraueren Kontaktfläche zwischen Reifen und Strasse führt und damit zu einem höheren textur-induzierten Strömungswiderstand.

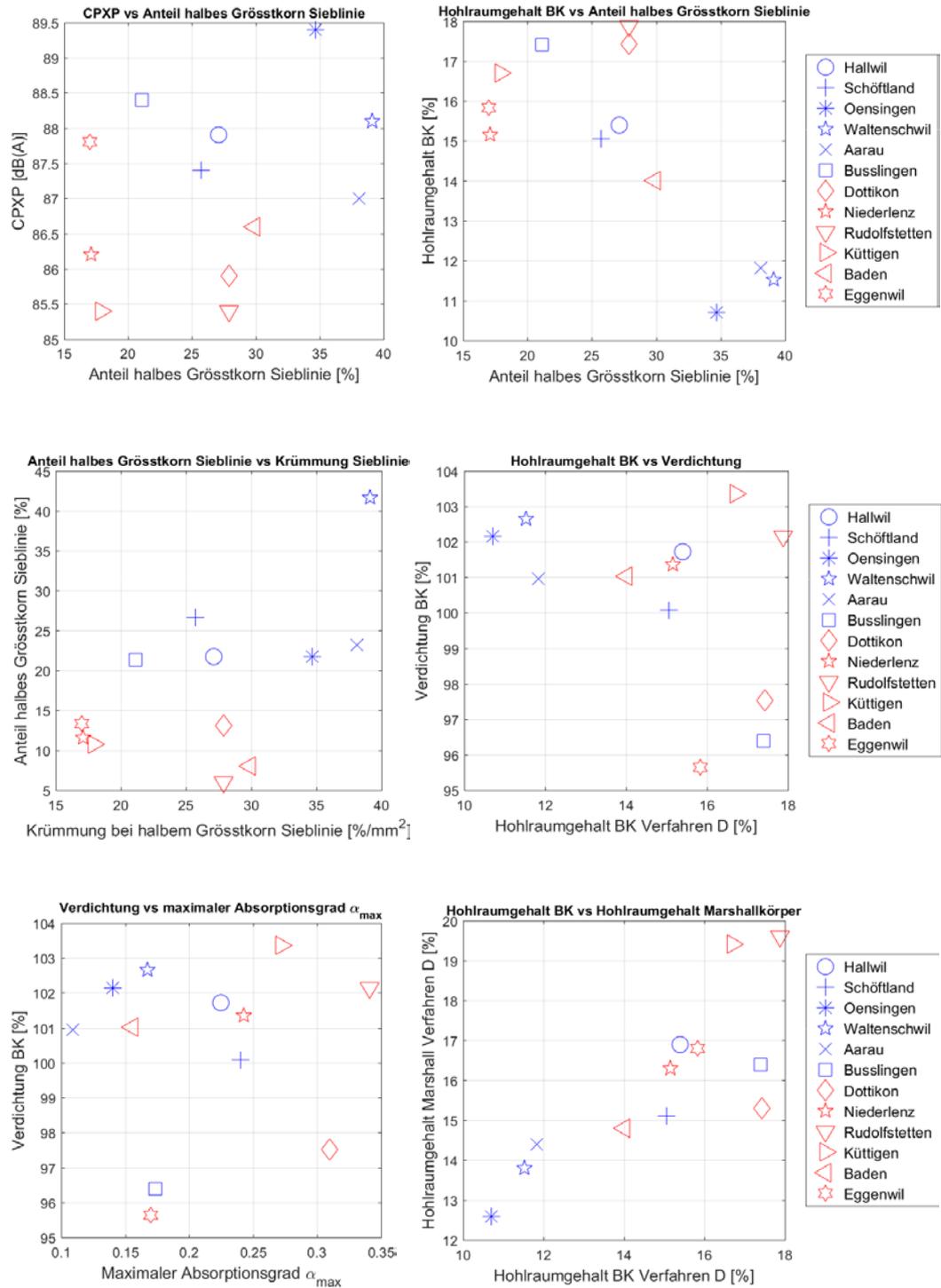


Abb. 36 Abhängigkeiten von Sieblinienparametern, Hohlraumgehalten und Verdichtung.

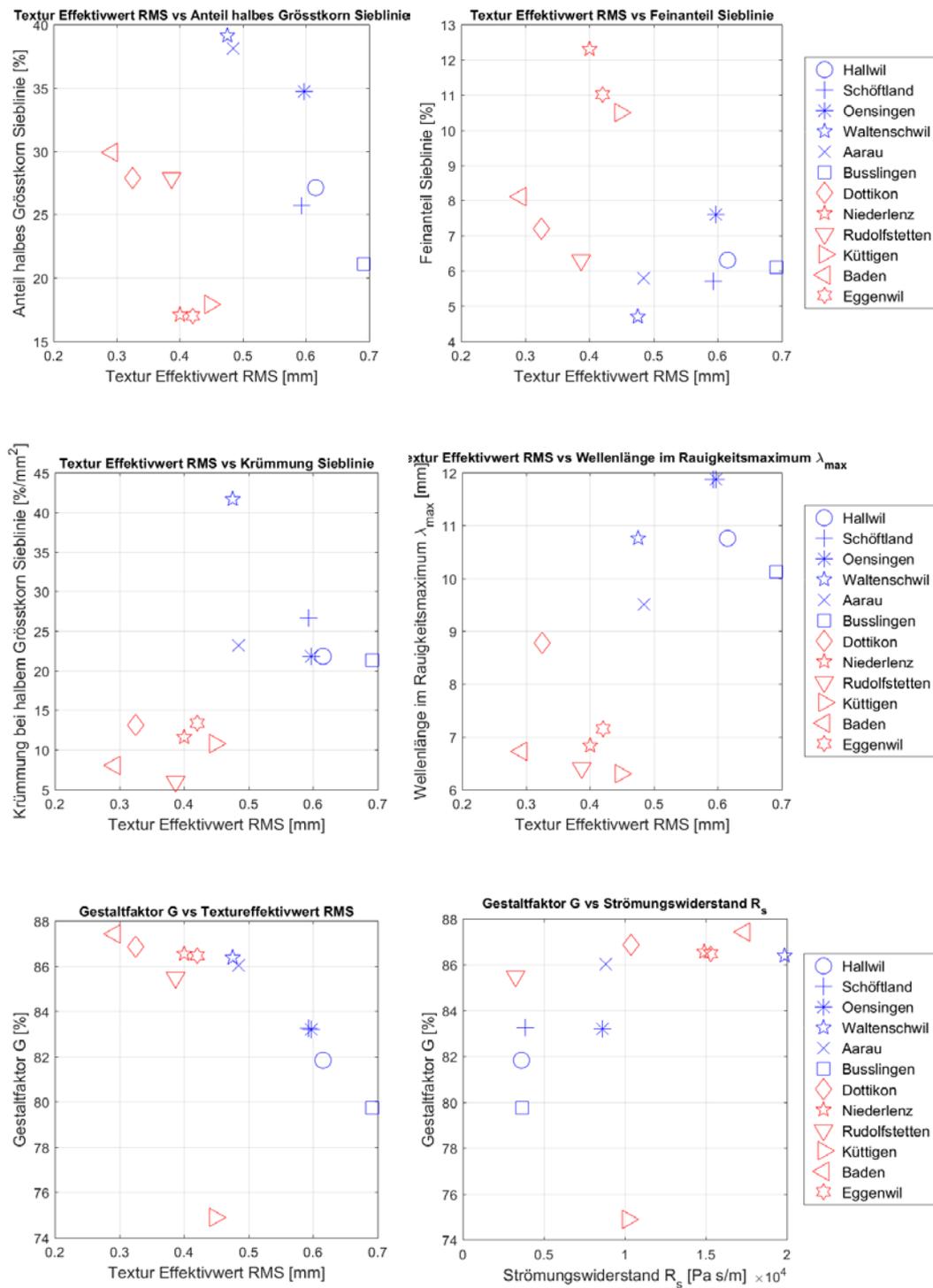


Abb. 37 Abhängigkeiten von Texturparametern.

### 3.3 Bewertung der Ergebnisse und Zusammenhänge

Die akustischen Nahfeldmessungen erfolgen kontinuierlich entlang der Einbaustrecken und haben damit per se eine erhebliche Redundanz bei der Charakterisierung der Belageigenschaft als Ganzes, die durch die Wiederholungen noch gesteigert wird. Durch die Vielzahl an Einzelmessungen an jedem Belageinbau mit vier Messpunkten pro Strecke und Wiederholungsmessungen an jedem dieser Messpunkte, besteht eine erhebliche Datenredundanz bei den akustischen in situ Messparametern. Es wurde zwar im Rahmen dieses Projekts pro Einbau nur eine Mischgutprobe untersucht, diese Ergebnisse wurden aber mit den Resultaten des Bauherrenprüflabors verglichen, wobei sich jeweils eine gute Übereinstimmung im Hinblick auf die Eigenschaften des Bindemittels und des Marshallprobekörpers ergab. Die präsentierten Bohrkernuntersuchungsergebnisse sind jeweils über vier Entnahmestellen und Bohrkern gemittelt und zusätzlich noch mit den Ergebnissen des Bauherrenprüflabors abgeglichen worden. Auch hier ist die Datenlage damit gut.

Insgesamt sind die Ergebnisse dieser Untersuchung mit einer Vielzahl von in sich konsistenten und voneinander unabhängigen akustischen und bautechnischen Messungen als plausibel und zuverlässig einzuordnen. Damit haben sich auch alle angewandten Messverfahren bewährt. Die Beobachtungen während des Einbaus sind zwar in sich ähnlich zuverlässig und auf jeweils mehreren Einzelbeobachtungen basierend, allerdings konnten hier Temperaturmessungen nur sporadisch erfolgen und das Walzregime auch nur punktuell ausgewertet werden. Schwankungen dieser Beobachtungsparameter sind damit nur unvollständig erfasst worden.

Die Ergebnisse dieses Forschungsprojekts wurden in situ auf regulären Belageinbauten gewonnen. Bei Messungen und Auswertungen wurde nach gängigen Regelwerken vorgegangen. Deshalb sind die Resultate von grosser praktischer Bedeutung.

Das Vorgehen der Baufirmen beim Einbau der Deckschichten, d.h. die eingesetzte Maschinentechnik, das Walzschema und die Einbautemperaturen war grundsätzlich ähnlich. Die Umsetzung des Walzregimes war aber auch von Zufällen geprägt und es erscheint wahrscheinlich, dass akustische Inhomogenitäten, wie sie in den CPX-Messungen auftreten, darin auch ihre Ursache haben. Auffällig war, dass bei allen Einbauten im Nahbereich hinter dem Asphaltfertiger die Walzen zur Vibration gebracht wurden und dies als unerlässlich zum Erreichen des vorgesehenen Verdichtungsgrades angesehen wurde.

Die beteiligten Baufirmen haben jeweils bei den gleichen Mischwerken bestellt. Gleiche Mischwerke liefern jeweils recht ähnliches Mischgut eines gewünschten Typs und die Mischguteigenschaften pausen sich auf Eigenschaften der fertigen Deckschicht erkennbar durch.

Die Mischgut- und Bohrkernanalysen des hier direkt beteiligten Partnerbaustoffprüflabors und der Bauherrenprüflabore erwiesen sich im Mittel als recht ähnlich. Das ist auch deshalb bemerkenswert, weil die Entnahmen von Mischgut und Bohrkernen nicht an den gleichen Stellen entlang der Strecken erfolgten.

Ein Ziel des Projektes bestand darin, die Umsetzung der SNR 640 436 in der Praxis zu untersuchen. Durch die abweichende Definition des Kantons Aargau und der Ausschreibung eines hohlraumreicheren „SDA B, Version Kanton Aargau“ ist ein strenger Vergleich mit den Vorgaben der SNR nicht sinnvoll. Fast immer lag der Bindemittelanteil im Mischgut knapp unter den Vorgaben der SNR 640 436. Das Bindemittel gehört zu den teuren Mischgutkomponenten. Die Tatsache, dass die SNR 640 436 nicht streng angewandt wurde ist eine schweizweit wichtige Beobachtung und sollte Anlass zu Diskussionen über Inhalt und Akzeptanz dieser SNR geben. Empfehlungen für punktuelle Präzisierungen der SNR 640 436 werden am Schluss dieses Berichtes gegeben.

Eine der wichtigsten Erkenntnisse des Projekts ist sicher, wie gross die Bandbreite von Belageigenschaften ein und desselben Belagstyps ist. Trotz Vorgaben in Regelwerken und deren weitgehender Einhaltung (soweit überhaupt in der Ausschreibung gefordert)

unterscheiden sich die bautechnischen und akustischen Eigenschaften erheblich. Die Ursache ist sicher in der grossen Spanne zwischen den noch zulässigen oberen und unteren Siebliniengrenzkurven in der SNR 460436 zu sehen. So lange die Mischwerke innerhalb so weiter Grenzen die für sie wirtschaftlichste Aggregatzusammensetzung auswählen dürfen, muss man entsprechende Spannweiten auch bei anderen bautechnischen und bei akustischen Eigenschaften in Kauf nehmen. Die untersuchten SDA Korngrössenverteilungen tendieren zu einem eher niedrigen Anteil kleiner und mittlerer Korngrössen und einem überproportional hohen Anteil der grössten Körner. Die Kornverteilungen sind dadurch insgesamt weniger ausgewogen.

Unter den 56 untersuchten bautechnischen und akustischen Variablen pro Einbau konnte eine Auswahl von sieben Beobachtungsgrössen identifiziert werden, die stellvertretend die Zusammenhänge zwischen bautechnischen und akustischen Eigenschaften gut beschreiben. Es sind dies:

1. Hohlraumgehalt der Bohrkern im Ausmessverfahren,
2. Akkumulierter Kornanteil entlang der Sieblinie bis zum halben Grösstkorn,
3. Strömungswiderstand,
4. maximaler Absorptionsgrad,
5. Texturgestaltfaktor,
6. Textureffektivwert und
7. CPXP-Pegel.

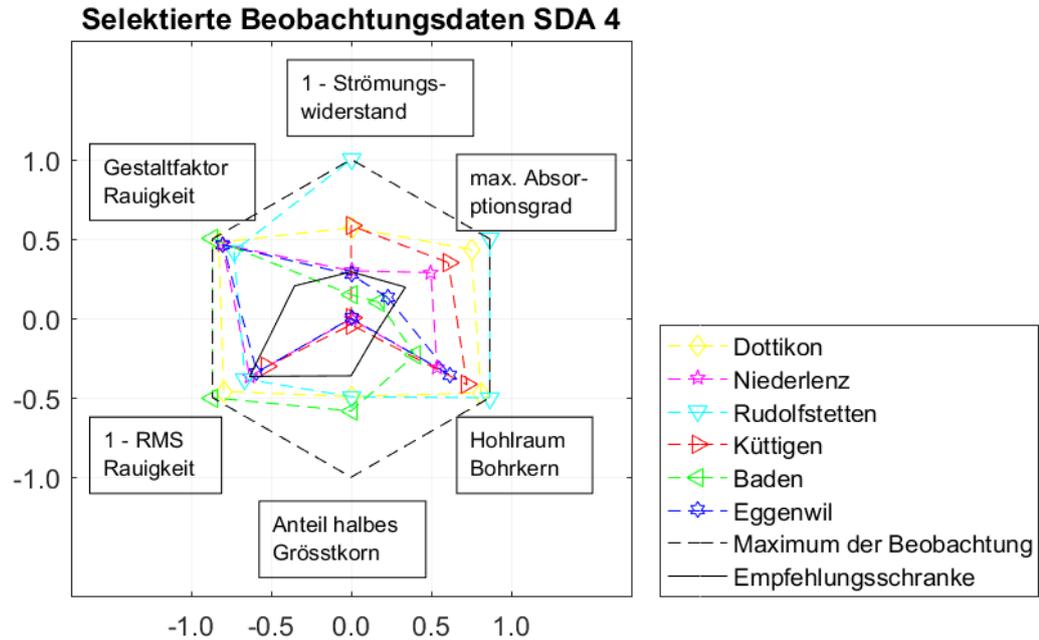
Die ausgewählten Stellvertreterparameter (1) bis (6) sind in den Abbildungen *Abb. 38* und *Abb. 39* in normierter Form für alle Einbauten dargestellt. Dazu wurden die Messwerte auf eine Skala von 0 (kleinster Wert) bis 1 (grösster Wert) normiert und für jeden Einbau mit spezifischen Farben und Symbolen auf der entsprechenden radialen Parameterachse geplottet und mit gestrichelten Linien zu unregelmässigen Sechsecken verbunden. Das regelmässige Sechseck aussen markiert die Maximalwerte. Die durchgezogenen Linien im Zentrum stellen Empfehlungsschranken dieser Forschungsarbeit dar (siehe Abschnitt 4 für die Zahlenwerte). Wenn die empfohlenen Werte Maximalwerte sind, wie beim Strömungswiderstand und der RMS-Rauigkeit, wurde die Achse umgedreht. Danach liegen Werte des empfohlenen Parameterbereichs in dem Ring ausserhalb des inneren Sechsecks der Empfehlungsschranken. Die Mehrzahl der Beobachtungsparameter liegt in diesem Empfehlungsbereich. Die verschiedenen Formen der Sechsecke reflektieren die Varianz der Messparameter und die individuellen Eigenschaften der Einbauten.

Von den selektierten Beobachtungsparametern für die SDA 4 Einbauten (*Abb. 38*) erfüllen beispielsweise alle die untere Schranke für den Hohlraumgehalt, aber nur vier weisen einen erstrebenswerten hohen Absorptionsgrad auf und nur drei den erwünscht niedrigen Strömungswiderstand. Die Einbauten in Rudolfstetten und Dottikon liegen bei allen sechs Beobachtungsvariablen im Empfehlungsbereich, der Einbau in Eggenwil nur mit zwei Variablen.

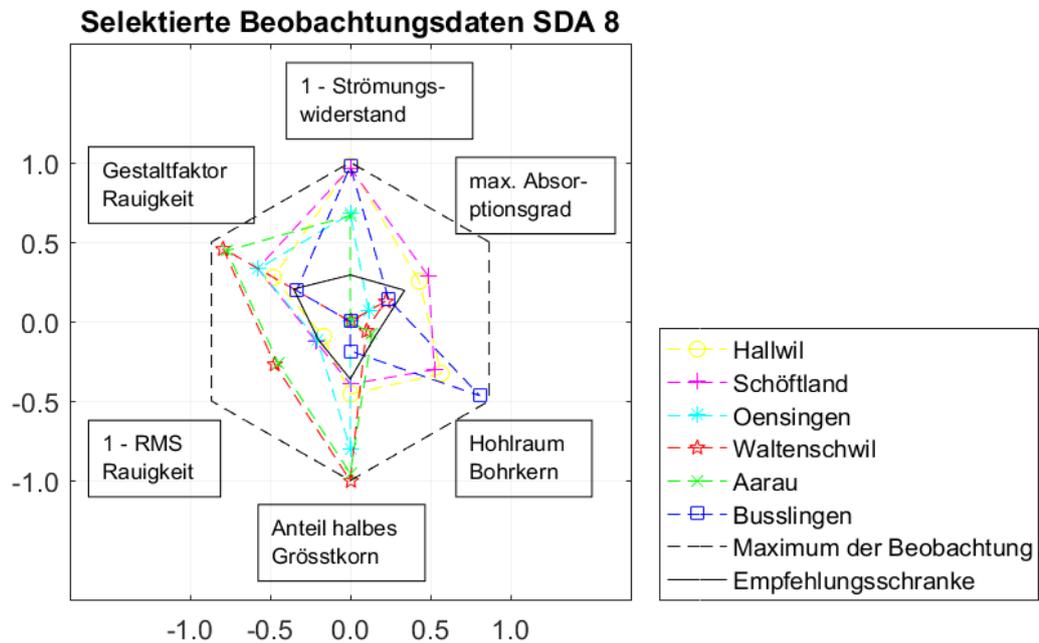
Die Beobachtungsparameter des SDA 8 liegen ebenfalls meist im Empfehlungsbereich rund um die Empfehlungsschranken (*Abb. 39*). Die Empfehlungskriterien für den SDA 8 unterscheiden sich nur durch einen höheren Schwellenwert für die RMS-Rauigkeit, weshalb sich das innere Sechseck in *Abb. 39* im Vergleich zu *Abb. 38* nur wenig verändert. Die untere Schranke für den Hohlraumgehalt erfüllen nur drei Einbauten, nur zwei weisen einen erstrebenswerten hohen Absorptionsgrad auf und fünf den erwünscht niedrigen Strömungswiderstand. Der Einbau Schöffland erfüllt alle sechs Schwellenwerte, der in Hallwil immerhin noch fünf und der in Busslingen nur zwei.

Wenn ein Einbau möglichst viele empfohlene akustische und bautechnische Parameterschwellenwerte einhält sollte dies zu niedrigeren Schalldruckpegeln führen. *Abb. 40* und *Abb. 41* legen offen, dass dies der Fall ist. Von den drei leisesten Belägen beider Belagstypen weisen jeweils zwei auch die höchste Anzahl von eingehaltenen Empfehlungswerten auf. Generell geht der Pegel mit ansteigender Anzahl von erfüllten Empfehlungsschranken bei beiden Belagstypen zurück, wie dies die eingezeichnete Trendlinie illustriert. Drei der zwölf Einbauten folgen nicht dem Trend, aber sie weisen Besonderheiten auf. Der SDA 4 Einbau in Küttigen gleicht erhebliche Schwächen der Sieblinie und die

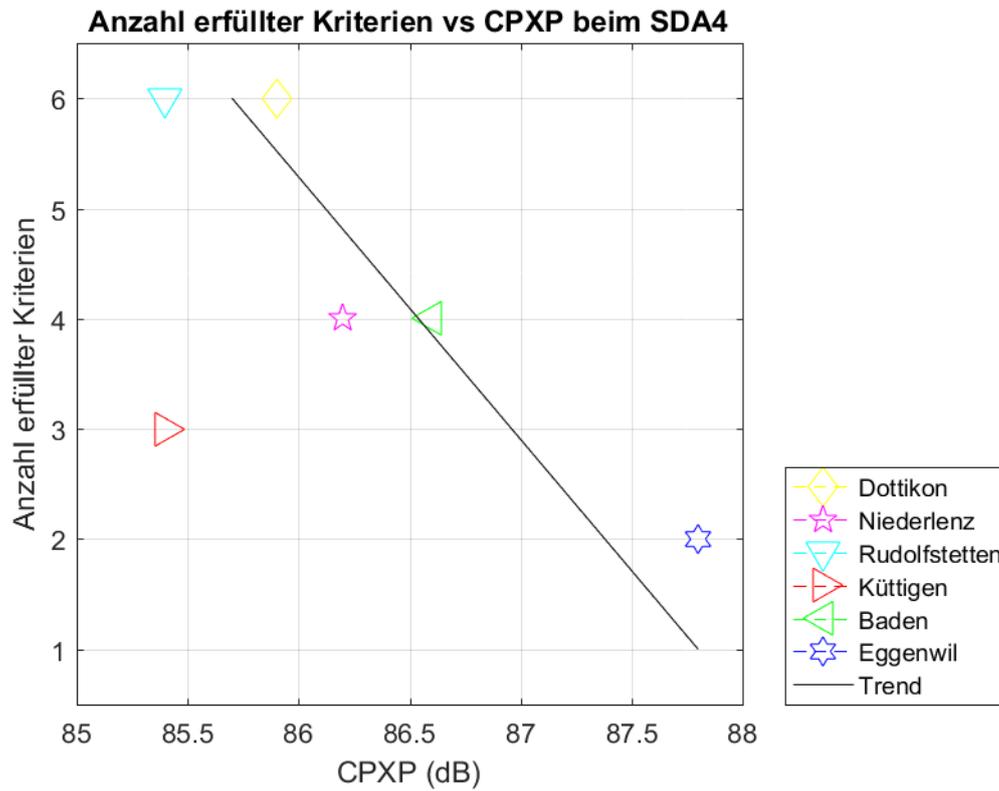
schlechtesten Texturwerte durch besonders grossen Hohlraum und günstige Absorptions- und Strömungswiderstandseigenschaften aus und wird dadurch knapp zum leiseren SDA 4 im Ensemble.



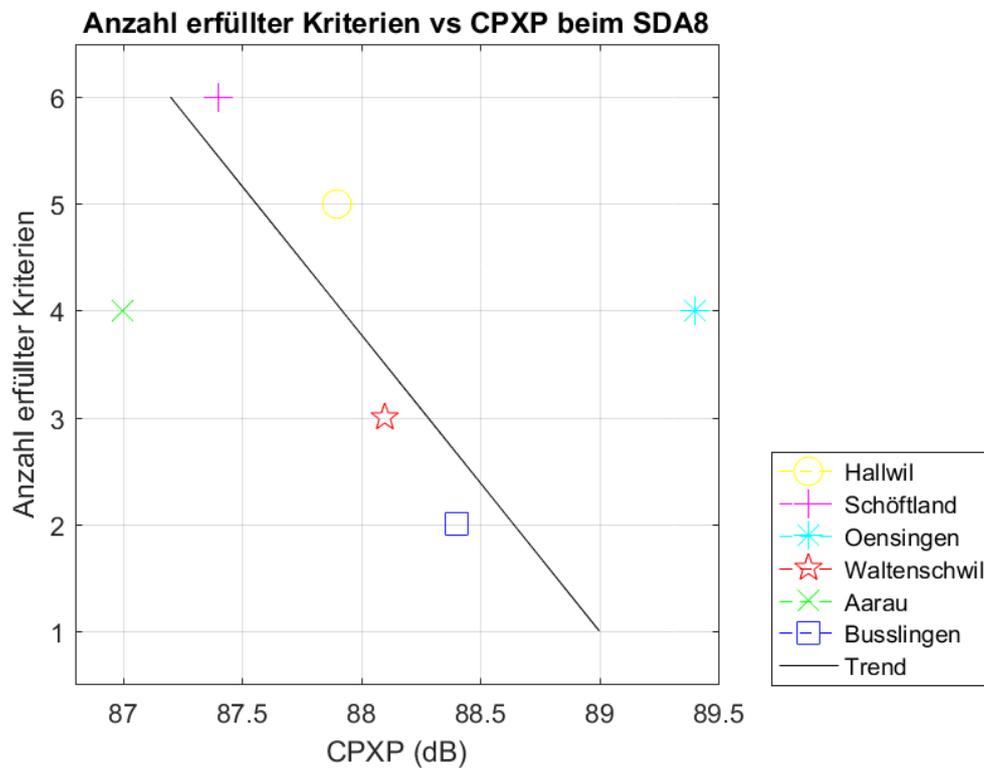
**Abb. 38** Wichtigste Beobachtungsgrössen der SDA 4 Einbauten in normierter Form und im Vergleich zu den Empfehlungsschranken (inneres Sechseck).



**Abb. 39** Wichtigste Beobachtungsgrössen der SDA 8 Einbauten in normierter Form und im Vergleich zu den Empfehlungsschranken (inneres Sechseck).



**Abb. 40** Anzahl der Einhaltungen der Projektempfehlungskriterien als Funktion des CPXP-Pegels für den SDA 4.



**Abb. 41** Anzahl der Einhaltungen der Projektempfehlungskriterien als Funktion des CPXP-Pegels für den SDA 8.

Beim SDA 8 zeichnen sich die Deckschichten in Aarau und Oensingen durch geringere Absorptionsgrade und Hohlraumgehalte aus als empfohlen. Der Belag in Aarau kann dies aber durch die besten Textur- und Sieblineieneigenschaften des SDA 8 Ensembles ausgleichen und dadurch zum leisesten SDA 8 werden. Die Deckschicht in Oensingen besitzt die schlechtesten Hohlraum- und Absorptionseigenschaften und nur mittelmässige Textureigenschaften und wird damit insgesamt zum lautesten Belag. Die drei Deckschichten in Küttigen, Aarau und Oensingen weisen bei wichtigen Belageigenschaften extreme Werte auf und damit insgesamt unausgewogene Eigenschaften. Deshalb fallen Sie aus dem empfohlenen Parameterrahmen.

Die Spannweiten einiger Beobachtungsvariablen unterscheiden sich zwischen den untersuchten Belagstypen deutlich. Beim SDA 8 ist die Spannweite bei Texturparametern und beim Hohlraumgehalt höher, beim SDA 4 dagegen bei Verdichtung und Feinanteil des Gesteinsaggregats. Die meisten Parameterspannen beider Belagstypen überlappen, eine klare Trennung zwischen den jeweils sechs SDA 4 und SDA 8 Bauten gibt es beispielsweise bei den Effektivwerten der Rauigkeit (niedriger bei SDA 4) und den Gestaltfaktoren (höher bei SDA 4, ausgenommen der Einbau in Küttigen).

Das Projekt hat die entscheidende Rolle der Siebkurve des Mischguts für die bautechnischen und akustischen Belageigenschaften illustriert. Auch bei sorgfältigstem Einbau kann eine ungünstige Sieblinie zu keinem bautechnisch und/oder akustisch zufriedenstellenden Ergebnis führen. Zum Beispiel paust sich die Aufteilung der SDA 4-Sieblinien in eine abknickende und damit an grober Gesteinskörnung reichere und eine eher kontinuierlichere, d.h. ausgewogenere Untergruppe bis in die Fahrbahnrauigkeit durch und damit auch bis in die CPX-Pegel. Zu erwarten sind auch Unterschiede in der mechanischen und akustischen Dauerhaftigkeit dieser beiden Untergruppen von SDA 4 Einbauten.

„Eine leise Fahrbahnoberfläche ist nur mässig rau und verfügt über einen hohen zugänglichen Gehalt an Hohlraum“. Diese Tatsache spiegelt sich in den akustischen und bautechnischen Untersuchungsergebnissen vielfach wider. Beispielsweise korreliert das Sieblinienattribut „Akkumulierter Masseanteil bis zum halben Grösstkorn“ gut mit dem Hohlraumgehalt (*Abb. 36* mittig rechts) und dieser sehr gut mit dem Absorptionsvermögen (*Abb. 36*, oben links) und letzteres sehr gut mit dem CPX-Pegel (*Abb. 34* mittig links). Dass es verschiedene Wege zur leisen Fahrbahnoberfläche gibt, illustriert der SDA 8 in Aarau: Er hat unter den Einbauten mit 8 mm Grösstkorn zwar das niedrigste Absorptionsvermögen aber gleichzeitig auch die niedrigste Rauigkeit und den günstigsten Gestaltfaktor und geht deshalb als leisester SDA 8, d.h. mit niedrigstem CPX-Pegel aus dem Gesamtvergleich hervor.

Akustisch überzeugen vor allem die SDA 4 Einbauten durch feinraue Oberflächen und hohes Absorptionsvermögen. Die auf Fahrbahnoberflächentextur empfindlichen CPXP-Pegel liegen beim SDA 8 im Mittel um fast 2 dB(A) über denen des SDA 4. Mit dem grobstolligen Messreifen vom Typ H liegen die SDA 8 CPX-Pegel nur noch rund 1 dB(A) höher. Die CPXH-Pegel zeigen eine gute lineare Korrelation mit den CPXP-Pegeln. Die Pegelspannen liegen bei beiden Belagstypen für CPXP jeweils bei 2.5 dB(A), für CPXH bei 2 dB(A).

Erfahrungsgemäss setzen sich die Poren eines relativ offenen semidichten Belags wie hier innerhalb weniger Jahre nach und nach zu und reduzieren damit die positiven Absorptionseigenschaften recht schnell 0. Auch die Textur wird ihre guten Eigenschaften voraussichtlich mit etwas Verzögerung nach und nach verlieren. Die SDA 8 Einbauten dürften diese Veränderungen etwas später erfahren, starten aber auch auf einem etwas ungünstigeren akustischen Niveau.

## 4 Empfehlungen

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens konnte eine Vielzahl von Beobachtungsvariablen und Zusammenhängen zwischen diesen erhoben und quantifiziert werden. Dies erlaubt die folgenden konkreten Empfehlungen:

- Den Mischwerken sollten für die verschiedenen Hohlraumklassen spezifische Sieblinien vorgegeben werden. Die hier realisierten B-(C-)Beläge haben gezeigt, dass die gesamte Sieblinienbandbreite der Norm ausgenutzt wird. Grund für die grosse Sieblinienbandbreite der Norm ist jedoch, dass damit drei Hohlraumgehaltsklassen realisiert werden können sollen. Die Festlegung der je nach Ausschreibung tatsächlich zu realisierenden Sieblinien bleibt so dem Belagswerk überlassen. Um Missverständnisse zu vermeiden, empfehlen wir deshalb die Festlegung getrennter Sieblinienverläufe für die verschiedenen Hohlraumgehaltsklassen in der SNR 640 436. Zum Beispiel könnten sich obere und/oder untere Siebliniengrenzkurven aus der SNR 640 436 jeweils um einige Massenprozentpunkte ihres jetzigen Abstands aufeinander zu bewegen.
- Für die akustische Wirkung ist ein höherer Sandanteil unschädlich, aufgrund der Anreicherung des Bindemittels mit Mineralstoff für die Dauerhaftigkeit des Belags aber wünschenswert. Die nahezu bei null Massenprozenten verlaufende untere Grenzkurve der Sieblinie nach Norm kann aus akustischer Sicht auch für die höheren Hohlraumgehaltsklassen angehoben werden.
- Neben enger beieinander liegenden unteren und oberen Grenzkurven sollte die Form der Sieblinie innerhalb dieser Bandbreite eingegrenzt werden, um eine ausgewogenere stetigere Korngrössenverteilung zu gewährleisten. Aufgrund der hier studierten Sieblinien lautet die Empfehlung für die Hohlraumklassen B/C:  
*Akkumulierter Kornanteil entlang der Sieblinie bis zur Kornfraktion mit dem halben Grösstkorndurchmesser von mindestens 25 M.-%.*
- Die Einteilung in feste semidichte Belagsklassen wie in der SNR 640 436 kann in der Kommunikation und zur Orientierung eine grosse Hilfe sein. Das Regelwerk sollte aber Vorgaben bezüglich des Hohlraumgehalts zulassen, welche zwischen diesen Klassen gelagert sind, wie dies im Aargau praktiziert wird, um den technischen Fortschritt nicht unnötig einzuengen.
- Vorgaben für den Hohlraumgehalt innerhalb der SNR 640 436 und bei ihrer praktischen Umsetzung sollten eindeutig und ausschliesslich auf das Ausmassverfahren (Verfahren D) bezogen sein, um Fehlinterpretationen und Missverständnisse zu vermeiden. Die oftmals praktizierte Umrechnung von Hohlraumgehalten, welche mit dem Verfahren B bestimmt wurden in Werte nach Verfahren D und umgekehrt mittels Faustformeln ist wegen der Unsicherheit dieser Formeln sehr fehleranfällig und führt grundsätzlich zu Verwirrung. Die Umrechnung funktioniert für die hier untersuchten Bohrkerne wesentlich besser als für die entsprechenden Marshallprobekörper, die jeweiligen Regressionsformeln sind aber belagsabhängig.
- Die Temperaturen des angelieferten Mischguts lagen jeweils innerhalb des angestrebten Korridors. Das beobachtete Vorgehen, bei langen Anfahrtswegen zur Baustelle bevorzugt Thermosilos einzusetzen, kann weiter empfohlen werden.
- Das Verdichten von SDA Mischgut auf der Strasse durch Walzen erfordert nach Angaben der hier befragten Praktiker auch Walzenvibrationen. Bautechnische Empfehlungen im Hinblick auf den Umfang der Vibrations- und Oszillationsvorgänge beim Verdichten von SDA erscheinen notwendig und sollten zwischen Theorie und Praxis diskutiert werden.
- Die bautechnischen Ergebnisse der direkt und indirekt, über den Bauherren, beteiligten akkreditierten Prüflabore erwiesen sich als in sich schlüssig und jeweils recht ähnlich, obwohl die Entnahmepunkte teilweise erheblich auseinander lagen. Einen Bedarf, die eingesetzten bautechnischen Analysemethoden oder deren Qualitätssicherung zu verbessern, konnte daher nicht erkannt werden. Bei der akustischen Erstprüfung erwiesen sich einige der untersuchten bautechnischen Parameter als wenig bis gar nicht signifikant, wie zum Beispiel die Eigenschaften des Bindemittels, trotzdem wird empfohlen künftig bei ähnlich gelagerten Fragestellungen auch diese Kennzahlen zu ermitteln, denn sie dürften für das mechanische und akustische Langzeitverhalten be-

deutsam sein. Auch die Anzahl von vier Bohrkernen pro Strecke und nur jeweils einer Mischgutprobe erwiesen sich unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten als gute Wahl.

- Die hier verwendeten Prüfverfahren zu Charakterisierung der akustisch relevanten Oberflächeneigenschaften haben sich sämtlich bewährt: (1) Bestimmung der Makrotextur mit optischem Verfahren, (2) Bestimmung von Strömungswiderstand in situ und (3) Messung des Absorptionsgrads in situ. Sie können für zukünftige Anwendungen empfohlen werden. Auch der Messumfang von vier Messpunkten pro Einbaustrecke ist ein guter Kompromiss zwischen Wirtschaftlichkeit und dem repräsentativen Erfassen flächenhaft verteilter Belageigenschaften. Vielfach bewährt hat sich die akustische Nahfeldmessung mit dem Anhängersystem (CPX-Verfahren). Die Strategie, in situ Messpunkte aufgrund von repräsentativen Belagsabschnitten im CPX-Pegelschrieb festzulegen, kann zur Nachahmung empfohlen werden.
- Das akustisch motivierte Streben nach einer Deckschicht mit wenig rauer Oberfläche und einem Netzwerk verbundener Hohlräume für die Schallabsorption sollte in einem SDA 4B/C oder SDA 8B/C zu niedrigen Reifen-Fahrbahn-Geräuschen führen, wenn folgende Zielvorgaben eingehalten werden:
  - *Akkumulierter Anteil der Sieblinie von mindestens 25 % beim halben Grösstkorn (siehe oben);*
  - *Texturgestaltungsfaktoren  $g$  von über 80 %;*
  - *niedrige vom Grösstkorn abhängige Effektivwerte der Oberflächenrauigkeit (beim SDA 4 RMS = 0.4 mm, beim SDA 8 RMS = 0.6 mm);*
  - *moderate Strömungswiderstände von unter 15'000 Pa s/m;*
  - *Bohrkernhohlraumgehalte nach Verfahren D von mindestens 12 Vol.-%.*

Mit den beiden letztgenannten Zielvorgaben sollte sich ein breitbandiges Absorptionsspektrum mit einem Absorptionsmaximum von mindestens 0.2 einstellen.

- Aus wirtschaftlichen und lärmspezifischen Gründen erscheint es unbedingt empfehlenswert, die zeitliche Entwicklung der hier untersuchten Deckschichten in einem ähnlichen Untersuchungsprogramm weiterhin zu beobachten, denn nur so kann beurteilt werden, wie sich die Varianz beim Einbau auf die akustische und bautechnische Dauerhaftigkeit auswirkt. Dazu wäre zumindest eine Wiederholung der zerstörungsfreien akustischen Prüfungen in Zeitintervallen von zu Beginn einem Jahr und später von zwei Jahren geboten.

Dieses Forschungsvorhaben hat auch den Blick auf weitere aussichtsreiche Vorhaben in der Zukunft ermöglicht:

- Dieses Forschungsvorhaben hat die beschränkte Nutzung von modernen Methoden des Einbau-Monitorings in der Baupraxis offengelegt. Eine kontinuierliche Aufzeichnung und Dokumentation der Maschinendaten, Einbautemperaturen und von georeferenzierten Walzübergängen durch die Baufirmen ist mittelfristig erstrebenswert und technisch bereits heute möglich. Der punktuelle Einsatz der Thermografie in diesem Projekt ist ein Beispiel und könnte auf eine kontinuierliche Messbasis erweitert werden. Der Einsatz von Verfahren der „intelligenten Verdichtung“ wäre ein weiterer Schritt in diese Richtung. In Verbindung mit ortsbezogenen Messungen der akustisch relevanten Oberflächeneigenschaften und mit CPX-Messungen, können solche Daten die Ursache von einbaubedingten bautechnischen und akustischen Inhomogenitäten entlang von Strassenneubauten erklären und damit helfen, diese künftig zu reduzieren. Insbesondere bei den bautechnisch anspruchsvollen semidichten lärmarmen Belägen erscheint dies empfehlenswert, um ihre akustische Performanz zu sichern.

## Anhänge

<b>I</b>	<b>Danksagung.....</b>	<b>91</b>
<b>II</b>	<b>Verwendete Messmittel .....</b>	<b>93</b>
<b>III</b>	<b>Beschreibung des Einbauvorgangs.....</b>	<b>95</b>
<b>IV</b>	<b>Vorgehen bei der statistischen Analyse.....</b>	<b>103</b>



# I Danksagung

Wir danken den nachfolgenden Baufirmen, die dieses Projekt durch ihre Teilnahme unterstützt haben:

Cellere AG, Aarau

H. Graf AG, Zufikon

Implenia Schweiz AG, Buchs

Niklaus AG, Feldbrunnen

Notter Tiefbau AG, Wohlen

Folgende Mischwerke haben das Asphaltmischgut für die untersuchten Einbauten geliefert:

Argobit AG, Schafisheim

Biturit AG, Mülligen

Miphalt AG, Niederbipp

Reussbelag AG, Bremgarten



## II Verwendete Messmittel

Tab. A 1 und Tab. A 2 listen die im Rahmen der akustischen Untersuchungen eingesetzten Messmittel auf. In den Jahren 2015 und 2016 kamen im Wesentlichen die gleichen Messmittel zum Einsatz. Ersetzt wurden die CPX-Messmikrofone und es wurden turnusmässig die CPX-Messreifen zur Jahreswende ausgetauscht.

**Tab. A 1** Verwendete Messmittel für die schalltechnischen Untersuchungen 2015.

Beschreibung	Position	Hersteller	Typ	SN / Version	
<b>CPX-Nahfeldmessmethode</b>					
½"-Mikrofone	1	links, vorne	Brüel & Kjær	4189	2719896
	2	links, hinten			2719897
	3	rechts, hinten			2748297
	4	rechts, vorne			2719899
½"-Mikrofon-Vorverstärker	1	links, vorne	Microtech Gefell	MV210	1904
	2	links, hinten			1905
	3	rechts, hinten			1906
	4	rechts, vorne			1907
Messreifen	P	rechts links	Uniroyal	Tiger Paw SRTT	DOT APX0 EVUU 0414
	H	rechts links	AVON	AV4	DOT ATJ8 PC 0314
CPX Messanhänger		M+P / Müller-BBM	CPX 750		XL9 CPX750 09095476
Datenerfassungssystem		Müller-BBM VAS	PAK Mobil MKII		1211M8320
Software zur Datenerfassung		Müller-BBM VAS	PAK		5.7SR7b
Lufttemperaturmessgerät		Electrotherm	PT100 2-L		-
Fahrbahntemperaturmessgerät (Laser)		Iac Infrared	IN 3000		12469
GPS-Sensor		ublox	regular		604419
Kalibrator		Brüel & Kjær	4231		1821045
<b>Infrarotkamera</b>		Jenoptik	VarioCAM		251411
<b>Schallabsorptionsgrad</b>					
Messsonde inkl. Signalkonditioni.		Microflown	Regular PU		900249-1r
Lautsprecher		Gradient	80 RW/40		1346862
Soundkarte Frontend		RME	Hammerfall DSP Multiface II		22457923
PCMCIA-Karte		RME	HDSP I/O Box		22416836
Messsoftware		Müller-BBM	m!abssitu		V1.1
<b>Oberflächentextur</b>					
Messbalken 2 m mit Lasermess-einrichtung und Ansteuerungsbox		Müller-BBM	M70722-00-0		291000
Datenerfassungssystem		Müller-BBM	RSTM_v1.1_201 2-06		-
<b>Strömungswiderstand Messbox</b>		Müller-BBM	M89319-01		334801
<b>Messgerät Meteorologie</b>		Greisinger electronic	GFTB100		-

**Tab. A 2** *Verwendete Messmittel für die schalltechnischen Untersuchungen 2016.*

Beschreibung	Position	Hersteller	Typ	SN / Version	
<b>CPX-Nahfeldmessmethode</b>					
½“-Mikrofone	1	links, vorne	PCB Piezotronics	377B02	LW131815
	2	links, hinten			LW131820
	3	rechts, hinten			LW133533
	4	rechts, vorne			LW131817
½“-Mikrofon-Vorverstärker	1	links, vorne	PCB Piezotronics	378B02	LW109670
	2	links, hinten			LW109671
	3	rechts, hinten			LW109667
	4	rechts, vorne			LW109668
Messreifen	P	rechts links	Uniroyal	Tiger Paw SRTT	DOT APX0 EVUU 2015
	H	rechts links	AVON	AV4	DOT ATJ8 PC 4614
CPX Messanhänger		M+P / Müller-BBM	CPX 750		XL9 CPX750 09095476
Datenerfassungssystem		Müller-BBM VAS	PAK Mobil MKII		1211M8320
Software zur Datenerfassung		Müller-BBM VAS	PAK		5.9 Build136
Lufttemperaturmessgerät		Electrotherm	PT100 2-L		-
Fahrbahntemperaturmessgerät (Laser)		Iac Infrared	IN 3000		12469
GPS-Sensor		ublox	regular		604419
Kalibrator		Brüel & Kjær	4231		1821045
<b>Infrarotkamera</b>		Jenoptik	VarioCAM		251411
<b>Schallabsorptionsgrad</b>					
Messsonde inkl. Signalkonditioni.		Microflown	Regular PU		900249-1r
Lautsprecher		Gradient	80 RW/40		1346862
Soundkarte Frontend		RME	Hammerfall DSP Multiface II		22457923
PCMCIA-Karte		RME	HDSP I/O Box		22416836
Messsoftware		Müller-BBM	m!abssitu		V1.1
<b>Oberflächentextur</b>					
Messbalken 2 m mit Lasermess-einrichtung und Ansteuerungsbox		Müller-BBM	M70722-00-0		291000
Datenerfassungssystem		Müller-BBM	RSTM_v1.1_20 12-06		-
<b>Strömungswiderstand Messbox mit Messfuss</b>		Müller-BBM	M89319-01		334801
<b>Messgerät Meteorologie</b>		Greisinger electronic	GFTB100		-



Der Geräteführer des Fertigers kann folgende Parameter einstellen, um ein optimales Einbaueergebnis zu erhalten:

- Einbaugeschwindigkeit,
- Tamperhub und –frequenz,
- Amplitude und Frequenz der Vibrationsbohle,
- Anpressdruck der Pressleisten und
- Einbauhöhe.

Diese Parameter müssen auf den Belagstyp angepasst werden. Bei den hier beobachteten Einbauten von jeweils zwei Fahrstreifen gleichzeitig fahren zwei Fertiger parallel in die gleiche Richtung, meistens nur wenige zehn Meter gegeneinander versetzt.

Der Asphaltfertiger heizt das Mischgut auf eine vorgegebene Temperatur auf (um 170 °C) und bringt es über einen Balken an seiner Rückseite vorverdichtet auf der Strasse auf. Die Vorverdichtung durch den Fertiger ist in der Regel höher als die Nachverdichtung durch die Walzen und muss zumindest so hoch sein, dass die Walzen gefahrlos darauf fahren können. Im Streckenbereich bis zu einigen zehn Metern hinter den Fertigern, wo die Belagtemperatur noch hoch genug ist (mindestens etwa 70 °C), fahren dynamische Walzen auf und ab. Mit Hilfe dieser Walzen wird die vorverdichtete Asphaltsschicht auf die gewünschte Lagerungsdichte gebracht, indem das Korngerüst mit Hilfe von Gewicht und Vibrationen umgelagert wird. Dynamische Walzen hatten hier typische Massen von 8 bis 12 Tonnen. Von Zeit zu Zeit vibrieren die Walzen in vertikale Richtung und/oder sie oszillieren in horizontale Richtung, um den Belag zu verdichten. Vibrierende Walzen sind tendenziell weniger schwer als statische Walzen und haben entsprechend niedrigere Linienlasten (z.B. 30 kg/cm gegenüber 50 kg/cm). Der Walzenfahrer kann folgende Parameter variieren, um zu einem optimalen Einbaueergebnis beizutragen:

- Walzgeschwindigkeit,
- Anzahl der Überrollungen,
- Zuschaltung der Vibrationseinrichtung,
- Frequenz, Amplitude und gegebenenfalls Richtung der Vibrationen.

Diese Parameter sind in dem belagsabhängigen Walzschema, nach dem sich die Fahrer richten sollten, definiert. Elektronische Erfassung von Temperatur- und Vibrationssensordaten und der georeferenzierten Position sowie eine Computersteuerung spielen eine zunehmende Rolle in modernen Walzen. Alle führenden Walzenhersteller arbeiten mit Hochdruck an der Umsetzung der sogenannten „Intelligenten Verdichtung“, bei welcher die Einhaltung des Walzschemas automatisch überwacht wird und dem Fahrer computergesteuert konkrete Handlungsempfehlungen gegeben werden [13]. Für die Einbauqualität ist die Umsetzung des Walzschemas entscheidend, denn wird zu viel oder zu stark vibriert, wird die Deckschicht zu stark verdichtet und der entstehende Hohlraumgehalt fällt zu niedrig aus. Bei den begleiteten Einbauten war nur einmal eine „intelligente“ Walze im Einsatz (*Abb. A 6*). Ab etwa 50 m bis zu gut 200 m hinter dem Asphaltfertiger fahren statische Walzen auf und ab, welche nicht vibrieren und meist geringfügig schwerer sind als dynamische Walzen. Der neue Belag ist in ihren Einsatzbereichen bereits so kalt, das die Walzen nicht mehr wesentlich verdichten können, sondern vor allem für das Glätten der Fahrbahnoberfläche zuständig sind.

Die Kommunikation zwischen anlieferndem Lastwagenfahrer, dem Fahrer des Asphaltfertigers, Einbaukolonnen und Walzenfahrern ist für einen geregelten Ablauf und erfolgreichen Einbau sehr wichtig. Dabei spielt der Bauführer (Polier) eine entscheidende Rolle. Beim Belagseinbau sind meist eingespielte Teams im Einsatz (jeweils etwa ein Dutzend Personen bei den hier beobachteten Einbauten). Exemplarische Fotos von den Baustellen und den Gerätschaften finden sich in *Abb. A 3 bis Abb. A 5*, Wärmebilder in *Abb. A 7 bis Abb. A 10*.

Ein Asphaltfertiger hat meist eine Breite von einem Fahrstreifen. Vor und hinter Verkehrsinseln oder Bushaltestellen kann er seinen Einbaubalken verlängern, um die Einbaubreite zu erhöhen. Bei Verkehrsinseln und Einmündungen wird viel von Hand gearbeitet, um glatte Übergänge zu ermöglichen. Dabei werden neben Schaufeln teilweise Verdichter (Rüttler), Gasflammenerhitzer und kleine wendige Walzen eingesetzt. Der Einbau kann dort leicht ins Stocken geraten. Ein stockender Einbau hat zur Folge, dass der gerade eingebaute Belag abkühlt bevor er gewalzt werden kann. Kanaldeckel werden zunächst überbaut und dann von Hand wieder freigelegt. Besondere Aufmerksamkeit widmen die Strassenbauarbeiter dem Strassenrand, der auch gezielt gewalzt wird und dazu gelegentlich auch mit einer Gasflamme erneut erhitzt wird. Diese Handarbeit führt tendenziell zu inhomogenen Belageigenschaften rund um Strassenränder und -übergänge.

Die Asphaltproben wurden aus der Fertigermulde kurz nach dem Befüllen oder seitlich vor dem Einbaubalken des Fertigers entnommen. Ein Transportkarton wird mit zwei bis drei Schaufelladungen, d.h. mit etwa 15 kg Mischgut befüllt. Die Probe muss repräsentativ und homogen sein, Entnahmeort und -zeit werden dokumentiert. Routinemässig werden Mischgutproben im Auftrag des Bauherrn zur Qualitätskontrolle entnommen, ebenso eine definierte Anzahl von Bohrkernen nach dem Einbau. Aus Kostengründen wird für die Mischgutprobenahme zuweilen die ausführende Baufirma tätig, was der Qualität der Proben eher nicht zuträglich ist. Nicht normgemäss ist die Entnahme von Rückstellproben zur Einbauüberwachung im Mischwerk, weil dort die Veränderung des Mischguts während des Transports zur Baustelle nicht erfasst werden kann. Prüfberichte über die Mischgutzusammensetzung und die Bohrkernkennwerte dienen der Qualitätskontrolle des Einbaus und sind mit entscheidend für die Abnahme des Bauwerks und gegebenenfalls Ausgangspunkt für bauvertragliche Auseinandersetzungen.

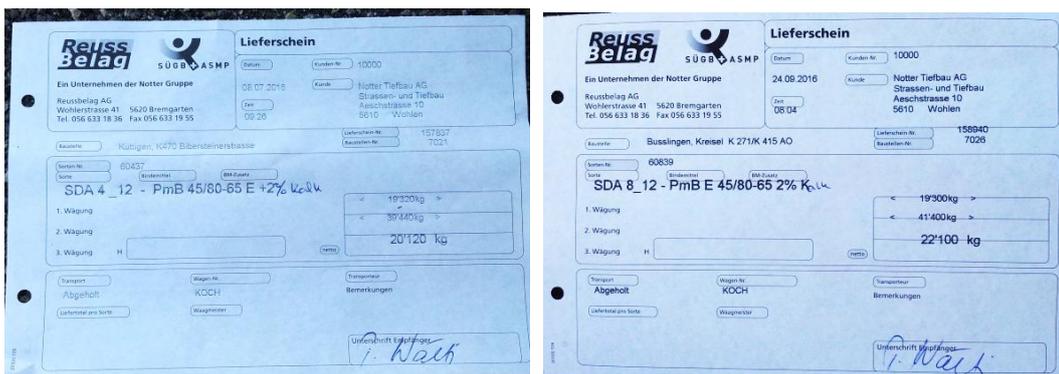
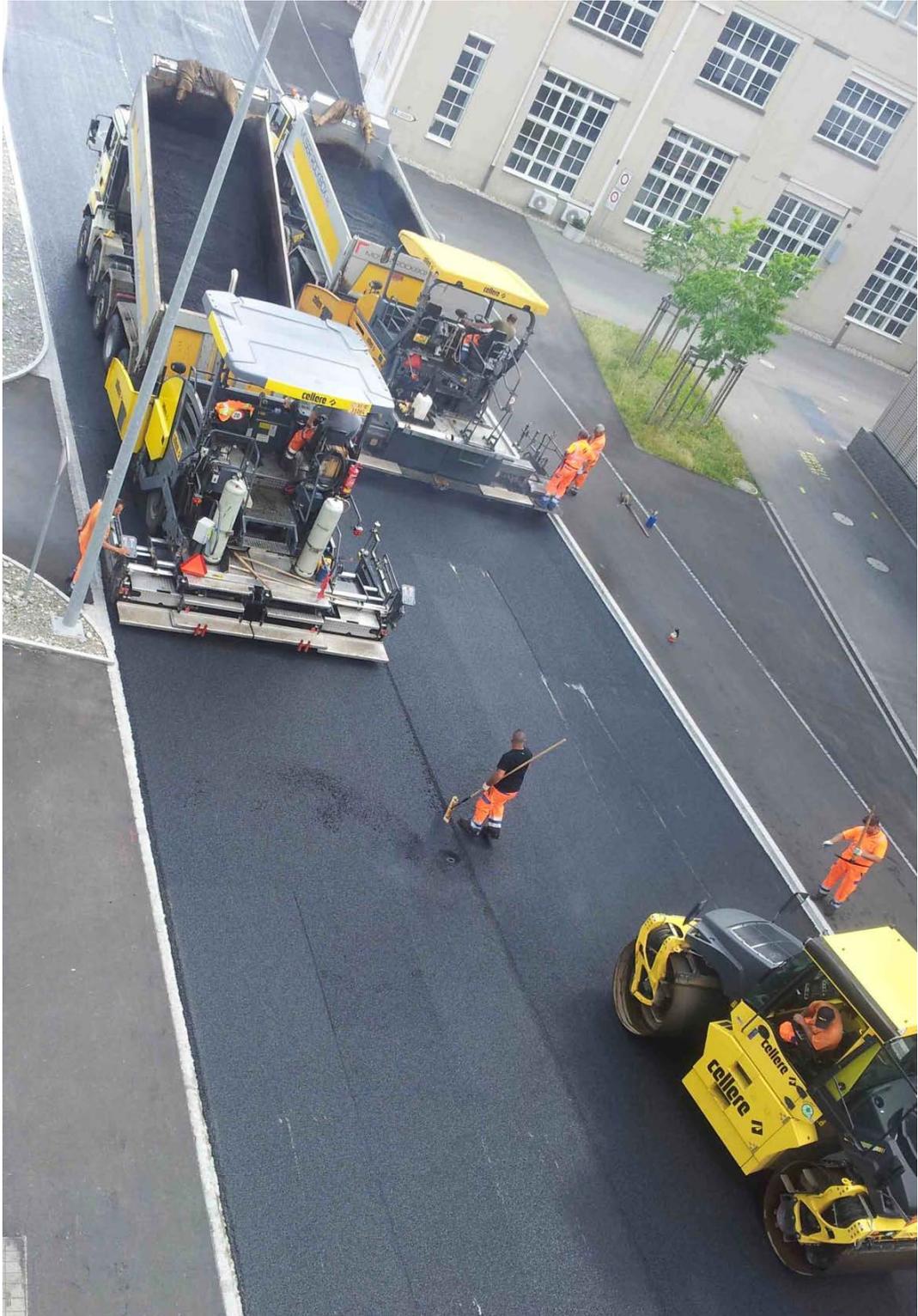


Abb. A 2 Fotografien von Mischgutlieferscheinen vom Einbau eines SDA 4 (links) und eines SDA 8 (rechts).



Abb. A 3 Dynamische (links) und statische Walze (rechts) beim Einbau eines SDA 8.



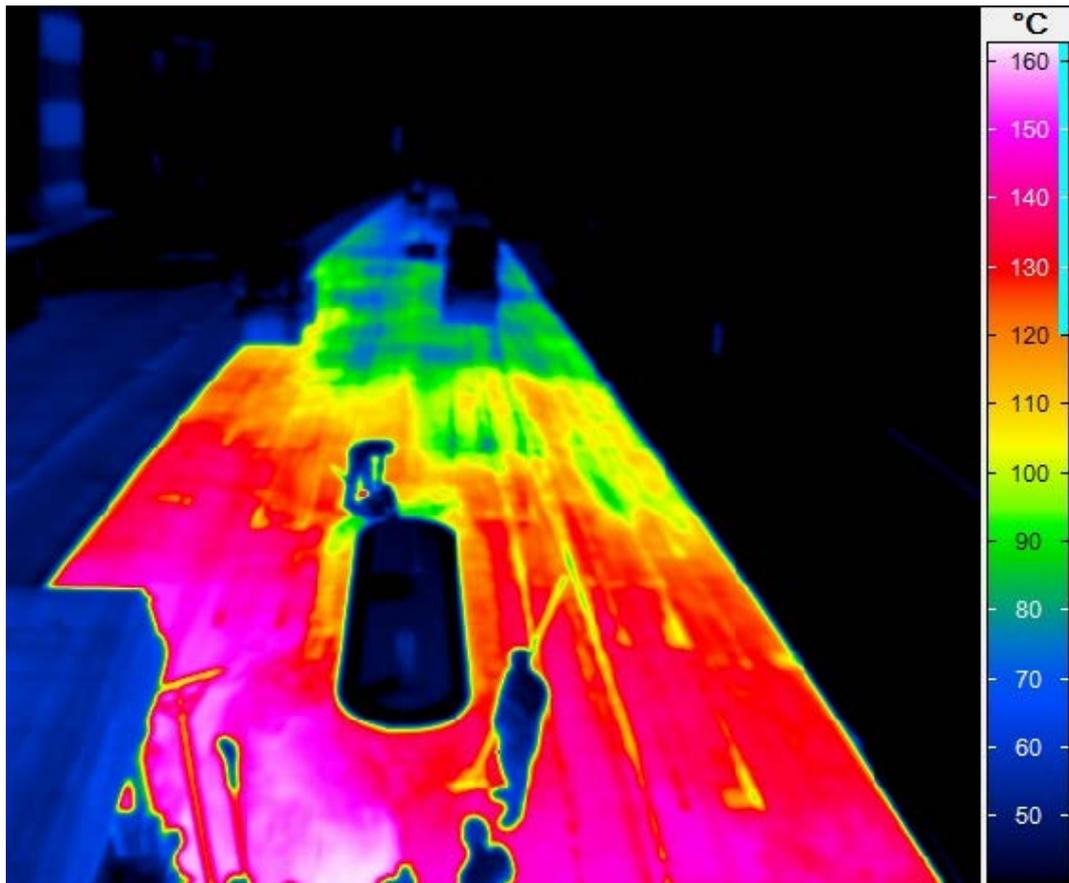
**Abb. A 4** Fotografie des Belageinbaus eines SDA 8 mit Mischgutlieferung durch offene Lastwagen, zwei parallel arbeitenden Asphaltfertigern und einer Walze.



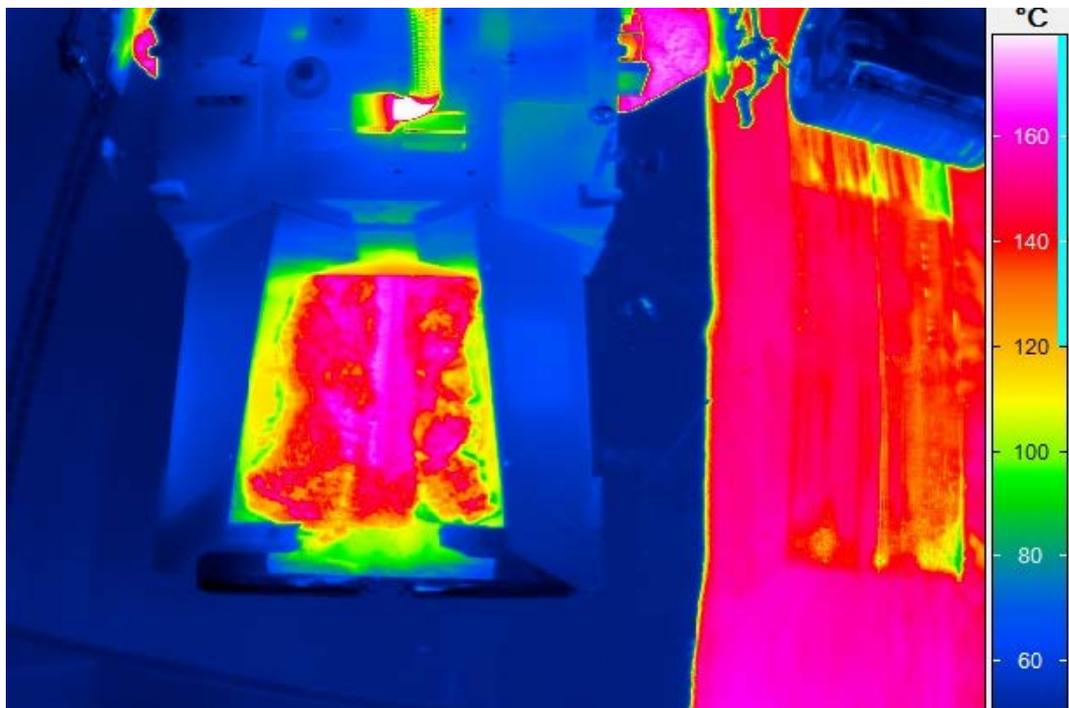
**Abb. A 5** Dynamische (Vordergrund) und statische Walzen (Hintergrund) im Einsatz.



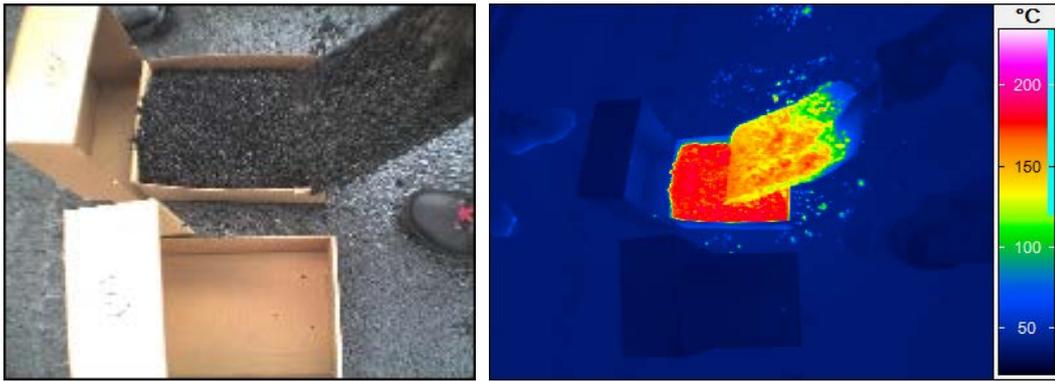
**Abb. A 6** Computermonitor einer „intelligenten“ dynamischen Walze im Einsatz.



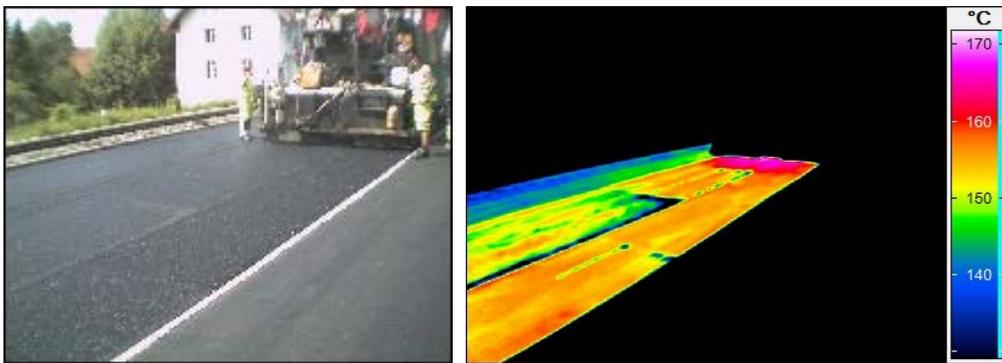
**Abb. A 7** Wärmebildaufnahme vom Belageinbau mit Asphaltfertiger (Vordergrund) und Walzen (Hintergrund). Man beachte die Temperaturskala rechts und die kühlen Spuren der Walzen (Bildausschnitt ähnlich zu **Abb. A 5** ).



**Abb. A 8** Wärmebildaufnahme einer Fertigermulde (links) und frisch eingebauter Belag (rechts) mit Walzspur.



**Abb. A 9** Foto einer Probenahme (links) und entsprechende Wärmebildaufnahme (rechts).



**Abb. A 10** Foto vom Belagseinbau (links) und entsprechende Wärmebildaufnahme (rechts).

Nach Beenden der Einbaumaßnahme und der zugehörigen Aufräumarbeiten und nach einer vorgeschriebenen Abkühlzeit wird der Belag für den Verkehr freigegeben. Die Deckschichten sind dann zunächst noch recht rau und das Bindemittel an der Oberfläche führt zu einer glänzenden Oberfläche (Abb. A 11).



**Abb. A 11** Detailfoto eines SDA 4 (links) und eines SDA 8 (rechts) unmittelbar nach Einbau.



## IV Vorgehen bei der statistischen Analyse

In einem ersten Schritt wurden alle Beobachtungen normiert. Zunächst wurden bestimmten nicht-numerischen Beobachtungen beliebige Zahlenwerte zugewiesen, beispielsweise wurden die Messorte durchnummeriert, zunächst SDA 8 nach Einbaudatum und dann fortlaufend SDA 4 nach Einbaudatum. Den verschiedenen Typen der anliefernden Lastwagen wurden jeweils identische ganze Zahlen zugewiesen, usw.. Ein direkter quantitativer Vergleich unterschiedlicher physikalischer Grössen wie z.B. von Temperaturen und Texturwellenlängen und von Einbauparametern wie etwa der Fahrzeit des Mischguts ist zunächst nicht möglich. Für eine statistische Auswertung und eine erste gemeinsame Visualisierung der vielfältigen Datensätze wurde daher zunächst für jede beobachtete Grösse der Mittelwert über alle zwölf Einbauten gebildet und dieser von den Einzelwerten subtrahiert. Wo Spannweiten anstatt von Einzelwerten angegeben waren, etwa bei den Einbautemperaturen, wurden die Mittelwerte der Spannweite angesetzt und diese über alle Einbauten gemittelt. Die resultierenden Werte wurden anschliessend auf die jeweilige maximale Magnitude normiert. Nach diesem Schritt liegen alle Beobachtungen in einem Zahlenintervall von -1 bis +1. Fehlende Werte wurden bei diesen Berechnungen ignoriert. Für jede Baustelle kann man die normierten Beobachtungswerte in Form eines Vektors darstellen und diese Vektoren als Zeilen in einer Beobachtungsmatrix (*Abb. 30*). Die Messwerte für die zeitlich erste Baustelle mit SDA 4 finden sich demnach in der siebten Zeile und z.B. die Einbautemperaturen aller 12 Einbauten in Spalte 28 (siehe dazu *Tab. 18*).

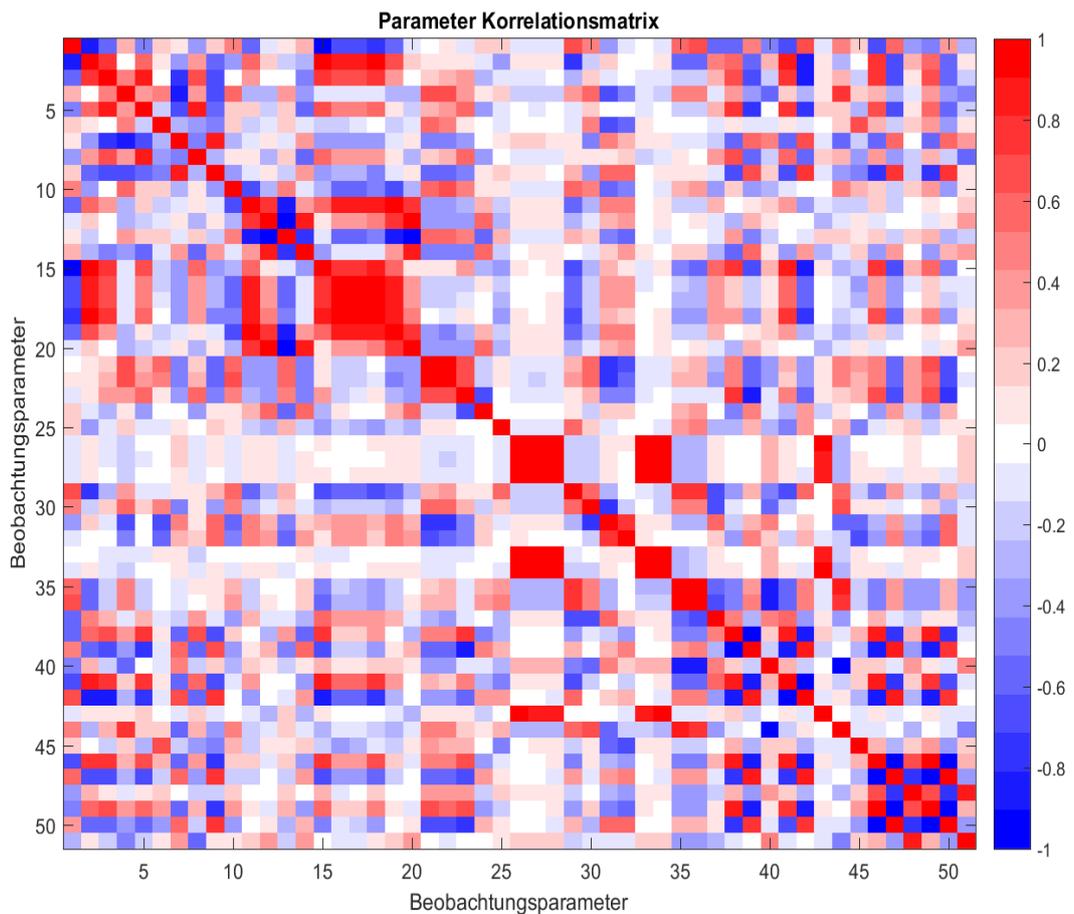
Neben der visuellen Analyse von *Abb. 30* sind die normierten Einbaubeobachtungen auch Grundlage einer mathematisch-statistischen Analyse. Die Struktur der Matrix aus *Abb. 30* und die Beziehungen zwischen den Matrixelementen bilden die statistischen Zusammenhänge zwischen den Beobachtungen und Messungen der zwölf Deckschichten ab. Eine bewährte Methode, um diese Zusammenhänge zu quantifizieren ist die Kovarianzanalyse [15][16]. Das Verfahren findet Anwendung in vielen Bereichen, in welchen Messdaten in Matrixform dargestellt werden können, z.B. in der medizinischen Bildverarbeitung oder der seismischen Signalanalyse [15]. Auf eine mathematisch rigorose Behandlung und numerische Aspekte bei Verarbeitung unsicherer Daten wird hier verzichtet (siehe [16], dort noch weitere Referenzen).

Die Grundidee der Kovarianzanalyse soll hier kurz erklärt werden. Zeilen und Spalten der Matrix werden jeweils als Vektoren aufgefasst und die „statistische Ähnlichkeit“ dieser Vektoren wird jeweils mit Hilfe ihrer Kovarianz quantifiziert, d.h. es wird die Summe der Produkte der einander entsprechenden Matrixelemente gebildet. Die Kovarianz der Vektoren  $i$  und  $j$  wird dem Matrixelement  $c_{ij}$  zugewiesen. Sind beide Vektoren identisch, so reduziert sich die Kovarianz zur Varianz, auch Autovarianz genannt, dem Quadrat der Standardabweichung. Da jeder Vektor sich selbst maximal ähnlich ist, liegen die Maxima der Kovarianzmatrix auf ihrer Diagonalen. Die Matrix ist symmetrisch, deshalb reicht es aus, nur die obere oder untere Dreiecksmatrix zu berechnen. Die Kovarianz macht tendenzielle Aussagen darüber, ob hohe Werte des einen Messparameters eher mit hohen oder eher mit niedrigen Werten der anderen Messparameter einhergehen.

Die Datenmatrix aus *Abb. 30* weist zwei Arten von Vektoren auf: Die Zeilen repräsentieren die Gesamtheit der Beobachtungen je Baustelle, die Spalten die Gesamtheit der Beobachtungen je Beobachtungsparameter, bzw. Messgrösse. Entsprechend gibt es auch zwei verschiedene Kovarianzmatrizen, zum einen eine „Baustellenkovarianzmatrix“ (eine  $12 \times 12$ -Matrix, die die Ähnlichkeit der Baustellen über die Beobachtungen hinweg darstellt) und zum anderen eine „Parameterkovarianzmatrix“ ( $56 \times 56$ -Matrix, die die Ähnlichkeit der einzelnen Beobachtungsparameter über die Baustellen hinweg darstellt). Beide Matrizen enthalten die gleiche Information, nur in anderer Art und Weise gespeichert. Zerlegt man die Kovarianzmatrizen jeweils in ihre mathematischen Grundkomponenten (Eigenwerte und Eigenvektoren) so kann man daraus die ursprünglichen Datenmatrix (wie in *Abb. 30*) rekonstruieren. Die grössten Eigenwerte mit ihren zugehörigen Eigenvektoren definieren die Hauptkomponenten bei der Rekonstruktion (dominierende „Eigenimages“, [15]). Diese Hauptkomponenten charakterisieren den wesentlichen Informati-

ongehalt der Datenmatrix, im vorliegenden Fall kann man anhand der Grössenverteilung der Eigenwerte der Kovarianzmatrizen auf abstraktem Niveau beurteilen, welche und wie viele der einzelnen Beobachtungsparameter besonders signifikant zur Beschreibung der Baustellen beitragen. Dies ist hilfreich zur Auswahl derjenigen Parameter, die im Detail untersucht werden sollen und bei der Bildung von Metaattributen aus verwandten Beobachtungsparametern. Die Eigenanalyse der Kovarianzmatrizen wird hier nicht weiter verfolgt, ist aber grundsätzlich ein erfolgversprechender Weg, insbesondere wenn grosse Datenmengen automatisiert zu untersuchen sind. Hier wird ein weniger abstrakter Weg gewählt, indem die beobachteten Kovarianzen zunächst zu Korrelationen normiert werden und diese quantitativ und deskriptiv betrachtet werden. Die Korrelationsmatrix entsteht aus der Kovarianzmatrix indem jedes Matrixelement durch das Produkt der Varianzen der beteiligten Vektoren normiert wird. Im Ergebnis liegen die Werte der Matrixelemente immer zwischen -1 und +1 und können daher in gleicher Weise farbkodiert dargestellt werden.

Die 12x12 Baustellenkorrelationsmatrix (Abb. 31) unterteilt sich in zwei Untermatrizen für die SDA 8 Beläge (oben links) und die SDA 4 Deckschichten (unten rechts). Die Eigenschaften dieser Einbauten sind untereinander jeweils ähnlicher (je kräftiger das Rot, desto mehr) als mit den Belagseinbauten des jeweils anderen Typs (Untermatrizen links unten und rechts oben). Die Parameterkorrelationsmatrix berechnet über alle Baustellen hinweg ist eine 56x56 Matrix (Abb. A 12). Sie unterteilt sich in akustische Parameter oben links, Baustellenparameter in der Mitte und bautechnische Parameter unten rechts.



**Abb. A 12** Parameterkorrelationsmatrix ermittelt über alle Baustellen hinweg.

## Glossar

Begriff	Bedeutung
Belagskorrektur <i>K<sub>b</sub></i>	Korrekturwert bei der Berechnung des Schallemissionspegels von Strassenverkehrsgereäuschen nach StL-86+ zur Berücksichtigung der gegenüber dem Referenzwert abweichenden akustischen Belagsgüte eines Fahrbahnbelags [1][2]. Formelzeichen: <i>K<sub>b</sub></i> Einheit: dB(A)
Bindemittelgehalt	Gehalt von Bindemittel an der Gesamtmasse eines Gemischs, wobei das Bindemittel dem Zusammenhalt des Aggregats aus Gesteinskörnern dient. Formelzeichen: <i>B</i> Einheit: Masse-%, M.-%
CPX	Nahfeldmessung ( <b>C</b> lose <b>P</b> roximity <b>M</b> easurement) Messung der Reifen-Fahrbahn-Gereäusche in Abständen von weniger als der doppelten grössten Abmessung des Reifens, also dem doppelten Durchmesser des Reifens. Messverfahren zur direkten Bestimmung der von der akustischen Belagsgüte beeinflussten Rollgereäusche [8].
<i>CPXP, CPXH</i>	Über die Länge einer Messfahrt auf einem zu untersuchenden Fahrbahnabschnitt gemittelter A-bewerteter Schalldruckpegel $L_{pA}$ für den Reifen P bzw. H.
Elastische Rückstellung	Für die Bestimmung der elastischen Rückstellung wird die Bindemittelprobe auseinandergezogen und dann beobachtet, inwieweit ihre ursprüngliche Länge wieder erreicht wird. Eine hohe elastische Rückstellung zeigt einen hohen Polymergehalt an. Einheit: %
Erweichungspunkt Ring und Kugel (RuK)	Der Erweichungspunkt Ring und Kugel (RuK) bestimmt die Temperatur, bei welcher eine Kugel durch einen bindemittelgefüllten Ring fällt und dabei einen Bitumenbeutel von 25 mm Tiefe bildet. Einheit: °C
Estimated Texture Depth <i>ETD</i>	Geschätzte Texturtiefe ( <b>E</b> stimated <b>T</b> exture <b>D</b> epth) Vorwiegend historisch bedeutsamer Texturparameter, der die Brücke zwischen MPD-Wert und Sandfleckverfahren bilden soll [6]. Formelzeichen: <i>ETD</i> Einheit: mm
Frequenzbewertung A	Die Frequenzbewertung A (A-Bewertung) ist die gehörbezogene Bewertung des Spektrums eines Gereäuschs. Tiefe und hohe Frequenzen werden vom menschlichen Gehör weniger gut wahrgenommen als mittlere Frequenzen im Bereich zwischen 1'000 Hz und 3'000 Hz. Aus diesem Grund werden gemessene Gereäuschspektren oft der sogenannten A-Bewertung unterzogen, die bewirkt, dass die Schallpegel der tief- und hochfrequenten Schallanteile dem Gehörempfinden ähnlich abgesenkt werden. Der Einzahlwert des Schalldruckpegels $L_p$ , der sich durch anschliessende energetische Summation aller Spektralanteile ergibt, enthält damit eine gehörähnliche Abhängigkeit von der spektralen Zusammensetzung des Gereäuschs.
Gestaltfaktor <i>g</i>	Formfaktor der Fahrbahnoberflächentextur. Akustisch günstig sind Oberflächen, die überwiegend konkav sind („breite Berge und schmale Täler“) mit Gestaltfaktoren über $g > 80$ % [11]. Formelzeichen: <i>g</i> Einheit: Prozent, %
Hohlraumgehalt <i>H<sub>bit</sub></i>	Der Hohlraumgehalt ist das Verhältnis von Hohlraumvolumen zu Gesamtvolumen eines Prüfkörpers (Marshallprobekörper oder Bohrkern). Der Hohlraumgehalt des Prüfkörpers setzt sich zusammen aus der Summe der Hohlräume, die untereinander verbunden sind und mit der Umgebung in Verbindung stehen und den nicht miteinander verbundenen Hohlräumen. Formelzeichen: <i>H<sub>bit</sub></i> Einheit: <i>dimensionslos</i> bzw. %
in situ	Vor Ort, auf der Strasse, auf dem eingebauten Fahrbahnbelag.
LAB	Lärmarme (Fahrbahn-) Beläge
Marshallprobekörper	Der Marshallprobekörper ist ein im Labor aus dem Mischgut durch Schlagverdichtung hergestellter künstlicher Prüfkörper. Seine Dichte, sein Hohlraum- und sein Bindemittelgehalt wird bestimmt, wie auch bei den entnommenen Bohrkernen.
Marshallversuch	Untersuchungsprogramm für den Marshallprobekörper. Der Marshallversuch beinhaltet

	auch die Bestimmung der Stabilität und der damit verbundenen Deformation (des tangentialen Fließwertes).
Module de richesse <i>MR</i>	Mass für die Dicke des Bitumenfilms, der die Aggregatkörner eines Mischguts umschliesst; ein hoher MR ist wichtig für die Dauerhaftigkeit eines Asphalts. Definiert als das Verhältnis von Bitumengehalt zum Verhältnis von Dichte des Kornes zur scheinbaren Dichte des Aggregatmixes und zur spezifischen Oberfläche. Letztere ist über bestimmte Prozentanteile von Korngrößen in der Sieblinie definiert. Formelzeichen: <i>MR</i> („Module de richesse“, richness modulus) Einheit: <i>dimensionslos</i>
Mean Profile Depth <i>MPD</i>	Mittlere Profiltiefe ( <b>Mean Profile Depth</b> ) Definiert als Mittelwert über die Mittelwerte der jeweils grössten Texturprofilspitzen in den beiden Hälften einer 100 mm Profilstrecke, jeweils bezogen auf das lokale Durchschnittsniveau des Texturprofils [6]. Formelzeichen: <i>MPD</i> Einheit: mm
Nadelpenetration	Die Penetration misst, wie weit eine Nadel (100g, Durchmesser 1 mm) unter Einwirkung ihres Eigengewichts innerhalb von fünf Sekunden in das zu prüfende Bindemittel eindringt. Einheit: 0.1 mm
Penetrationsindex <i>PI</i>	Rechenwert, in welchen die Werte für Nadelpenetration und RuK eingehen. Für eine spezifische Bindemittelklasse muss <i>PI</i> in gewissen Grenzen liegen. Bei den hier untersuchten Einbauten wurde polymermodifiziertes Bindemittel PmB 45/80-65 verwendet, d.h. die Nadelpenetration sollte zwischen 45 und 80 0.1 mm liegen und der Ring und Kugel Wert mindestens bei 65 °C. Formelzeichen: <i>PI</i> Einheit: <i>dimensionslos</i>
Polymermodifiziertes Bindemittel PmB	Bindemittel mit einem gewissen Anteil an Polymeren; wird dadurch elastischer. Bei den hier untersuchten Einbauten wurde polymermodifiziertes Bindemittel PmB 45/80-65 verwendet.
Rauigkeitstiefe <i>R, R<sub>eff.</sub>, R<sub>eff.,max</sub></i>	Der senkrechte Abstand eines Punktes auf der Fahrbahnoberfläche von einer gedachten horizontalen Ebene über der Fahrbahnoberfläche [6]. Formelzeichen: <i>R</i> , bei quadratischem Mittelwert (Effektivwert) über ein Wellenlängenband: <i>R<sub>eff.,s</sub></i> , bei maximalem Wert im Wellenlängenspektrum der Fahrbahnoberflächenrauigkeit: <i>R<sub>eff.,max</sub></i> Einheit: m
Rauigkeitswellenlänge <i>λ, λ<sub>max</sub></i>	Der kleinste Abstand zweier Punkte mit gleicher Höhenlage in einer räumlich periodischen Abfolge der Oberflächenwelligkeit (Rauigkeit) einer Deckschicht [6]. Formelzeichen: <i>λ</i> , bei Wellenlänge im Maximum des Wellenlängenspektrums der Fahrbahnoberflächenrauigkeit: <i>λ<sub>max</sub></i> Einheit: m
Raumdichte <i>ρ<sub>b</sub></i>	Die Raumdichte ist das Verhältnis von Masse zu Volumen eines aus Asphaltmischgut hergestellten Laborprobekörpers inklusive seiner zugänglichen und geschlossenen Hohlräume. Formelzeichen: <i>ρ<sub>b</sub></i> Einheit: kg/m <sup>3</sup>
Reifen-Fahrbahn-Geräusch (Rollgeräusch)	Geräusch, das beim Abrollen des Fahrzeugreifens auf der Fahrbahnoberfläche entsteht (Rollgeräusch). Schalldruckpegel und Spektrum des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs hängen sowohl von den statischen und dynamischen Eigenschaften des Reifens, von den belagstechnischen Eigenschaften der Deckschicht und den akustischen Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche als auch von der Geschwindigkeit <i>v</i> ab.
Rohdichte <i>ρ<sub>m</sub>, ρ<sub>min</sub>, ρ<sub>bit</sub></i>	Die Rohdichte eines Asphaltmischgutes ist das Verhältnis von Masse zu Volumen der im Mischgut enthaltenen Materialien (Bitumen und Mineralstoffgemisch). Formelzeichen: bei Mischgut: <i>ρ<sub>m</sub></i> , bei Mineralstoffgemisch: <i>ρ<sub>min</sub></i> , bei Bitumen: <i>ρ<sub>bit</sub></i> Einheit: kg/m <sup>3</sup>
Root Mean Square <i>RMS</i>	Effektivwert, Quadratisches Mittel, <b>Root Mean Square</b> Quadratischer Mittelwert der Abweichungen der Rauigkeitstiefe vom Mittelwert [6]. Einheit: m

Schallabsorptionsgrad $\alpha, \alpha_{\max}$	Verhältnis der in der Deckschicht absorbierten Schallintensität zur gesamten auf die Deckschicht einfallenden Schallintensität. Dimensionslose Grösse, deren Wert zwischen 0 und 1 liegen kann. Der Schallabsorptionsgrad ist abhängig von der Frequenz und vom Schalleinfallswinkel. In EP10 wurde ausschliesslich bei senkrechtem Schalleinfall gemessen.  Formelzeichen: $\alpha$ , zur Angabe der Abhängigkeit von der Frequenz $f$ : $\alpha(f)$ , bei maximalem Wert im Frequenzspektrum Schallabsorptionsgrads: $\alpha_{\max}$ Einheit: <i>dimensionslos bzw. %</i>
Schalldruckpegel $L_p, L_{pA}$	Logarithmiertes Verhältnis eines Schalldruckes $p$ zum Bezugsschalldruck $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ . Formelzeichen: $L_p$ , bei Frequenzbewertung A: $L_{pA}$ Einheit: dB, bei Frequenzbewertung A: oft dB(A)
Schalldruckpegel- $L_{Aeq,20m}$	Der über eine Streckenlänge von 20 m energetisch gemittelte A-bewertete Schalldruckpegel einer CPX-Messung Formelzeichen: $L_{Aeq,20m}$ Einheit: dB(A)
Schalldruckpegel $L_{\max}, L_{AF,\max}$	Der während eines zeitlich schwankenden Schallereignisses, z.B. der Vorbeifahrt eines einzelnen Fahrzeugs an einer Messstelle, auftretende höchste Wert des A-bewerteten, mit Zeitkonstante FAST gemessenen Schalldruckpegels. Allgemein: Maximalpegel $L_{\max}$ . Formelzeichen: $L_{\max}, L_{AF,\max}$ Einheit: dB, dB(A)
SDA	<b>Semi-dichter Asphalt / Semi-dichte Asphaltbeläge</b>
Sieblinie	Summenkurve welche die Korngrössenverteilung eines (mineralischen) Gesteinskörnungsgemisches beschreibt. Sie wird ermittelt durch Sieben der Probe, wobei Siebe mit sukzessive abnehmender Maschenweite verwendet werden und jede Maschenweite einer bestimmten Korngrösse entspricht. Einheit: Siebdurchgang in Masse-%, M.-%
SN	Schweizer Norm (SN)
SNR	Schweizer Regel (SNR), Gesamtheit normativer Dokumente mit limitiertem Konsens.
Spektrum	Frequenzverteilung eines Geräusches (Schalles). Die meisten der von technischen und natürlichen Schallquellen erzeugten Geräusche setzen sich aus vielen Schallanteilen unterschiedlicher Frequenz zusammen. Die Summe der Schallanteile, jeder gekennzeichnet durch einen bestimmten Schallpegel und eine bestimmte Frequenz, bildet das Spektrum des Geräusches. Werden die Schallanteile in aneinander gereihten terzbreiten Bändern zusammengefasst, spricht man von Terzspektrum. Oft werden die Schallanteile auch in oktavbreiten Bändern zu Oktavspektrern zusammengefasst. Bei Terzbändern entspricht das Verhältnis der oberen zur unteren Grenze des Frequenzbandes ungefähr dem musikalischen Tonintervall einer Grossen Terz von 5:4. Bei Oktavbändern stimmt das Verhältnis mit dem einer musikalischen Oktave überein: 2:1.
Stabilität	Die Stabilität ist die maximale Bruchkraft, die während des Marshallversuchs ermittelt wird. Einheit: kN
Standardabweichung $\sigma$	Ein Mass für die Streuung der Messwerte um ihren Mittelwert. Formelzeichen: $\sigma$ Einheit: dieselbe wie die Messgrösse
Strömungswiderstand $R_s^*$	Verhältnis der Differenz $\Delta p$ des Luftdrucks innerhalb eines von Luft durchströmten Volumens und dem umgebenden statischen Luftdruck zu einer gegebenen Strömungsgeschwindigkeit $u$ der Luft. Formelzeichen: $R_s^*, R_s$ Einheit: Pa s/m
Tangentialer Fließwert	Die Deformation, welche bei der maximalen Bruchkraft zur Bestimmung der Stabilität beobachtet wird ist der sogenannte tangentielle Fließwert. Ihre Bestimmung ist Teil des Marshallversuchs. Einheit: mm
Textur	geometrische Gestalt der Fahrbahnoberfläche
Verdichtungsgrad	Der Verdichtungsgrad ist das Verhältnis der Raumdichte $\rho_b$ des aus der fertigen Schicht entnommenen Bohrkerns zu der des Marshallprobekörpers, der mit auf der Baustelle an gleicher Stelle entnommenem Mischgut hergestellt wurde. Einheit: <i>dimensionslos bzw. %</i>

---

VSS

Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute  
Verband der **S**trassen- und Verkehrsfachleute **S**chweiz

---

## Literaturverzeichnis

### Weisungen und Richtlinien des ASTRA

- 
- [1] Bundesämter für Umwelt BAFU und Strassen ASTRA (2006), „**Leitfaden Strassenlärm – Vollzugshilfe für die Sanierung, Stand Dezember 2006**“, Anhang 1c: „**Technisches Merkblatt für akustische Belagsgütemessungen auf Strassen**“, Version 31.07.2013.
- 
- [2] Bundesamt für Strassen ASTRA und Bundesamt für Umwelt BAFU (2006), „**Leitfaden Strassenlärm – Vollzugshilfe für die Sanierung-, Anhang 1a: Bestimmung von akustischen Belagskennwerten als Grundlage für den Leitfaden Strassenlärm BAFU/ASTRA**“ (Version vom 18.12.2006).
- 

### Normen

- 
- [3] SNR 640 436 (Juni 2013), „**Semidichtes Mischgut und Deckschichten SDA – Festlegungen, Anforderungen, Konzeption und Ausführung**“, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, Zürich.
- 
- [4] SNR 640 436 (September 2015), „**Semidichtes Mischgut und Deckschichten SDA – Festlegungen, Anforderungen, Konzeption und Ausführung**“, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, Zürich.
- 
- [5] SN 670 406 (2012), EN 12697-6 „**Asphalt – Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 6: Bestimmung der Raumdichte von Asphaltprüfkörpern**“.
- 
- [6] ISO 13473-1-3:1997-2002 (1997-2002), „**Characterization of pavement texture by use of surface profiles, Part 1: Determination of mean profile depth, Part 2: Terminology and basic requirements related to pavement texture profile analysis, Part 3: Specification and classification of Profilometers**“.
- 
- [7] DIN EN 29053:1993-05 (1993), „**Akustik; Materialien für akustische Anwendungen; Bestimmung des Strömungswiderstands**“.
- 
- [8] ISO/DIS 11819-2 (2012), „**Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 2: The close-proximity method**“, Layout zur Durchsicht und Prüfung vom 30.08.2012.
- 

### Dokumentation

- 
- [9] Paquet de recherche „**Lärmarme Beläge innerorts**“, TP1 Recherche et innovation, Rapport intermédiaire et aperçu des projets de la phase 1.
- 
- [10] Rychen, P., Pittet, M., Fénart, M.-A., Dumont A.-G. (2016): „**Revêtements peu bruyants – EP1 : Formulation des revêtements peu bruyants**“. Schlussbericht EP1 im Teilprojekt TP1 "Forschung und Innovation" des Forschungspaketes "Lärmarme Beläge innerorts", Bundesamt für Strassen ASTRA und Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern.
- 
- [11] Beckenbauer, T. (2001): „**Akustische Eigenschaften von Fahrbahnbelägen**“. Strasse und Autobahn, Jahrgang 2001, Heft 10, Seite 553, Kirschbaum Verlag GmbH, Bonn.
- 
- [12] Beckenbauer, et al. (Aug. 2002), „**Einfluss der Fahrbahnstruktur auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch**“, Forschungsberichte aus dem Forschungsprogramm des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen und der Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen e.V., Heft 847, Bergisch Gladbach.
- 
- [13] Chang, G.K. (2016), „**Intelligent compaction for hot-mix asphalt**“, Workshop on «Non Destructive Technologies» at the 3rd International Conference on Transportation Geotechnics, Guimaraes.
- 
- [14] Männel, M. (2005): „**Entwicklung eines in-situ Systems zur Messung des komplexen Reflexionsfaktors von Fahrbahnbelägen für den fahrenden Einsatz**“, Diplomarbeit, Universität Stuttgart.
- 
- [15] Kneib, G., Bardan, V. (1997): „**3D targeted multiple attenuation**“. Geophys. Prosp., 45, 701-714.
- 
- [16] Kirilin, R.L., Done, W.J. (1999): „**Covariance analysis for seismic signal processing**“, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, USA.
- 
- [17] Bundesamt für Umweltschutz (1987), „**Computermodell zur Berechnung von Strassenlärm**“, Schriftenreihe Umweltschutz, Nr. 60.
- 
- [18] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (1995), „**Strassenlärm: Korrekturen zum Strassenlärm-Berechnungsmodell**“, Mitteilungen zur Lärmschutz-Verordnung (LSV) Nr. 6.
-

**Dokumentation**

---

- [19] Kneib, G., Belcher, D., Beckenbauer, T., Beyeler, H.-P., „**Continuous road traffic noise monitoring and aging of asphalt surfaces**“, Internoise, Paper 1021, Hamburg, 2016.
- 
- [20] Beckenbauer, T., Belcher, D., Kneib, G. (2015), „**Forschungspaket lärmarme Beläge innerorts: Teilprojekt 1, Einzelprojekt 5: Verbesserung des Genauigkeitsgrads akustischer Messmethoden**“, Bundesamt für Strassen ASTRA, Bundesamt für Umwelt BAFU.
-

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 1</b>	<i>Organigramm des Forschungspakets „Lärmarme Beläge innerorts“.</i>	18
<b>Abb. 2</b>	<i>Summenhäufigkeit von CPX<sub>P</sub>-Werten von drei unterschiedlichen lärmarmen Belagstypen (LAB) innerorts, jeweils ein Jahr nach Einbau gemessen. Quelle: Interne Auswertung Müller-BBM einer Vielzahl von eigenen Messungen in verschiedenen Projekten.</i>	18
<b>Abb. 3</b>	<i>Schematische Darstellung der Zusammenhänge von Mischgutzusammensetzung und Bauweise mit Fahrbahneigenschaften.</i>	19
<b>Abb. 4</b>	<i>Sollwerte für die Korngrößenverteilung SDA 4 nach SNR 640 436.</i>	21
<b>Abb. 5</b>	<i>Sollwerte für die Korngrößenverteilung SDA 8 nach SNR 640 436.</i>	21
<b>Abb. 6</b>	<i>Oberflächentemperaturabfall mit der Entfernung vom Fertiger (links) und Oberflächentemperatur als Funktion der Anzahl der Walzvorgänge (rechts) beim Einbau des SDA 8 in Schöffland.</i>	31
<b>Abb. 7</b>	<i>Arithmetischer Mittelwert der CPX-Pegel beider Fahrstreifen für die Reifentypen P (blau) und H (rot) für den SDA 8 (links) und SDA 4 (rechts).</i>	35
<b>Abb. 8</b>	<i>Arithmetischer Mittelwert der Kb-Werte beider Fahrstreifen für die Reifentypen P (blau) und H (rot) für den SDA 8 (links) und SDA 4 (rechts).</i>	35
<b>Abb. 9</b>	<i>CPX-Pegel-Ort-Verlauf für die Reifentypen P und H für die SDA 4 in Dottikon, Niederlenz und Küttigen.</i>	36
<b>Abb. 10</b>	<i>CPX-Pegel-Ort-Verlauf für Reifentypen die P und H für die SDA 4 in Baden, Rudolfstetten und Eggenwil.</i>	37
<b>Abb. 11</b>	<i>CPX-Pegel-Ort-Verlauf für die Reifentypen P und H für die SDA 8 in Hallwil, Schöffland und Oensingen.</i>	38
<b>Abb. 12</b>	<i>CPX-Pegel-Ort-Verlauf für die Reifentypen P und H für die SDA 8 in Waltenschwil, Aarau und Busslingen.</i>	39
<b>Abb. 13</b>	<i>Mittlere Terzspektren über die gesamte Länge der Fahrbahn und alle Fahrstreifen für die Reifentypen P und H für die SDA 4 in Dottikon, Niederlenz und Küttigen.</i>	40
<b>Abb. 14</b>	<i>Mittlere Terzspektren über die gesamte Länge der Fahrbahn und alle Fahrstreifen für die Reifentypen P und H für die SDA 4 in Baden, Rudolfstetten und Eggenwil.</i>	41
<b>Abb. 15</b>	<i>Mittlere Terzspektren über die gesamte Länge der Fahrbahn und alle Fahrstreifen für die Reifentypen P und H für die SDA 8 in Hallwil, Schöffland und Oensingen.</i>	42
<b>Abb. 16</b>	<i>Mittlere Terzspektren über die gesamte Länge der Fahrbahn und alle Fahrstreifen für die Reifentypen P und H für die SDA 8 in Waltenschwil, Aarau und Busslingen.</i>	43
<b>Abb. 17</b>	<i>Schallabsorptionsgradspektren aller SDA 4 Messpunkte (mit min-max Bereich).</i>	47

<b>Abb. 18</b> Schallabsorptionsgradspektren aller SDA 8 Messpunkte (mit min-max Bereich). .....	48
<b>Abb. 19</b> Textur-Wellenlängenspektren aller SDA 4 Messpunkte.....	49
<b>Abb. 20</b> Textur-Wellenlängenspektren aller SDA 8 Messpunkte.....	50
<b>Abb. 21</b> Siebkurven der Mischgutproben von den SDA 4 Einbauten. ....	54
<b>Abb. 22</b> Siebkurven der Mischgutproben von den SDA 8 Einbauten. ....	55
<b>Abb. 23</b> Hohlraumgehalte für die SDA 4 Einbauten (links) und die SDA 8 Einbauten (rechts) für Marshallprobekörper (oben), Bohrkerne (mittig) und im direkten Vergleich (unten). ....	58
<b>Abb. 24</b> Differenzen der Hohlraumgehalte nach Ausmessen (Verfahren D) und nach Tauchwägung (Verfahren B) für die SDA 4 Einbauten (links) und die SDA 8 Einbauten (rechts). ....	59
<b>Abb. 25</b> Bindemittelgehalt versus Hohlraumgehalte für die SDA 4 Einbauten (links) und die SDA 8 Einbauten (rechts). ....	59
<b>Abb. 26</b> Variabilität ausgewählter Beobachtungsgrößen entlang der SDA 4 Einbaustrecken; maximaler Absorptionsgrad (oben), RMS-Wert der Textur (mittig oben), Gestaltfaktor $g$ der Textur (mittig unten) und Hohlraumgehalt der Bohrkerne nach Verfahren D (unten). ....	61
<b>Abb. 27</b> Variabilität ausgewählter Beobachtungsgrößen entlang der SDA 8 Einbaustrecken; maximaler Absorptionsgrad (oben), RMS-Wert der Textur (mittig oben), Gestaltfaktor $g$ der Textur (mittig unten) und Hohlraumgehalt der Bohrkerne nach Verfahren D (unten). ....	62
<b>Abb. 28</b> Relative Standardabweichungen vom jeweiligen Mittelwert über alle Baustellen des gleichen Belagstyps für die SDA 4 Einbauten. Gezeigt sind akustische Parameter und Baustellenbeobachtungen (oben) sowie bautechnische Ergebnisse des Baustoffprüflabors (unten). ....	64
<b>Abb. 29</b> Relative Standardabweichungen vom jeweiligen Mittelwert über alle Baustellen des gleichen Belagstyps für die SDA 8 Einbauten. Gezeigt sind akustische Parameter und Baustellenbeobachtungen (oben) sowie bautechnische Ergebnisse des Baustoffprüflabors (unten). ....	65
<b>Abb. 30</b> Normierte Messdaten und Beobachtungswerte für alle zwölf Einbauten, blau geschriebene Ortsnamen beziehen sich auf SDA 8 Einbauten, rote auf SDA 4. .....	70
<b>Abb. 31</b> Baustellenkorrelationsmatrix mit SDA 8 Einbauten (blaue Ortsnamen) und SDA 4 Einbauten (rote Ortsnamen). ....	71
<b>Abb. 32</b> Parameterkorrelationsmatrix SDA 4. ....	72
<b>Abb. 33</b> Parameterkorrelationsmatrix SDA 8. ....	73
<b>Abb. 34</b> Abhängigkeiten des Parameters CPXP von anderen Parametern.....	77
<b>Abb. 35</b> Abhängigkeiten von maximalem Absorptionsgrad $\alpha_{max}$ und Strömungswiderstand $R_S$ .....	78
<b>Abb. 36</b> Abhängigkeiten von Sieblinienparametern, Hohlraumgehalten und Verdichtung. .....	80

<b>Abb. 37</b> <i>Abhängigkeiten von Texturparametern.....</i>	81
<b>Abb. 38</b> <i>Wichtigste Beobachtungsgrößen der SDA 4 Einbauten in normierter Form und im Vergleich zu den Empfehlungsschranken (inneres Sechseck). .....</i>	84
<b>Abb. 39</b> <i>Wichtigste Beobachtungsgrößen der SDA 8 Einbauten in normierter Form und im Vergleich zu den Empfehlungsschranken (inneres Sechseck). .....</i>	84
<b>Abb. 40</b> <i>Anzahl der Einhaltungen der Projektempfehlungskriterien als Funktion des CPXP-Pegels für den SDA 4. ....</i>	85
<b>Abb. 41</b> <i>Anzahl der Einhaltungen der Projektempfehlungskriterien als Funktion des CPXP-Pegels für den SDA 8. ....</i>	85



## Tabellenverzeichnis

<b>Tab. 1</b> Bautechnische Eigenschaften der ausgewählten Beläge nach SNR 640 436.....	23
<b>Tab. 2</b> Unterscheidung und Relevanz der Herstellungs- und Messparameter. ++ = sehr relevant, + = relevant. ....	23
<b>Tab. 3</b> Einbauten von SDA 4. ....	25
<b>Tab. 4</b> Einbauten von SDA 8. ....	26
<b>Tab. 5</b> Häufigkeit der Belagswerke und Baufirmen bei den untersuchten Einbauten. ....	26
<b>Tab. 6</b> Bautechnische und akustische Parameter und zugehörige Prüfnormen. ....	27
<b>Tab. 7</b> Beobachtungen bei SDA 4 Einbauten. ....	29
<b>Tab. 8</b> Beobachtungen bei SDA 8 Einbauten. ....	30
<b>Tab. 9</b> Durchführung und Temperaturen bei CPX und in situ Messungen auf SDA 4. ...	32
<b>Tab. 10</b> Durchführung und Temperaturen bei CPX und in situ Messungen auf SDA 8. .	32
<b>Tab. 11</b> CPX <sub>P</sub> - und CPX <sub>H</sub> -Werte mit Standardabweichungen $\sigma$ sowie Kb-Werte in dB(A). .....	33
<b>Tab. 12</b> Ergebnisse der in situ Messungen auf den SDA 4 Deckschichten. ....	45
<b>Tab. 13</b> Ergebnisse der in situ Messungen auf den SDA 8 Deckschichten. ....	46
<b>Tab. 14</b> Richtwerte für semidichte Deckschichten nach SNR 640 436. ....	51
<b>Tab. 15</b> Ergebnisse der bautechnischen Untersuchungen für die SDA 4 Deckschichten. .....	52
<b>Tab. 16</b> Ergebnisse der bautechnischen Untersuchungen für die SDA 8 Deckschichten. .....	53
<b>Tab. 17</b> Kurzbewertung der Laborergebnisse (BM=Bindemittel-, HR=Hohlraumgehalt).	56
<b>Tab. 18</b> Beobachtungsparameter für die statistische Analyse. ....	69
<b>Tab. 19</b> Ausgewählte und als besonders aussagefähig betrachtete Parameter. ....	76



# Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 31.03.2017

#### Grunddaten

Projekt-Nr.: 2013/004  
Projekttitel: Forschungspaket Lärmarme Beläge innerorts TP1, EP10: Sensitivität der akustischen Eigenschaften lärmarmen Beläge aufgrund der Variabilität bei der Herstellung  
Enddatum: 31.03.2017

#### Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Ziel des Forschungsprojektes war, die Variabilität der bautechnischen Eigenschaften von semidichten lärmarmen Belägen vom Typ SDA 4 und SDA 8 hinsichtlich ihres Einflusses auf die akustische Performanz zu bewerten. Dazu wurden sechs Einbauvorhaben für jeden Belagstyp begleitet und dokumentiert. Aufgrund anschliessender akustischer und baustofftechnischer Untersuchungen wurden insgesamt 56 akustische und bautechnische Beobachtungsvariablen festgelegt und über eine Korrelationsanalyse wurden Zusammenhänge zwischen Baustellen und Beobachtungsgrössen gesucht und ihre statistische Varianz betrachtet. Beim Einbau gingen die Baufirmen jeweils recht ähnlich vor. Die Hohlraumgehalte lagen teilweise über den Vorgaben der SNR 640436 für die eigentlich ausgewählte Belagklasse B. Der Kanton Aargau war in seinen Ausschreibungen von der SNR 640436 abgewichen. Die Standardabweichungen der bautechnischen Variablen zwischen den Einbauten gleicher Beläge liegen überwiegend unter 25 Prozent, wobei die typische Schwankungsbreite bei den SDA 4-Einbauten deutlich höher ist als beim SDA 8. Die höchste Varianz ergibt sich bei den Kennwerten für die Sieblinien. Die Spannen der CPX-Pegel liegen jeweils um 2.5 dB. Die Texturparameter der Deckschicht weisen überwiegend Standardabweichungen unter 15 Prozent auf, Absorptionsgrad und Strömungswiderstand liegen wesentlich höher. Signifikante Korrelationen zeigen sich auch zwischen bautechnischen und akustischen Grössen. Aufgrund der hier untersuchten Einbauten ergibt sich eine repräsentative Teilmenge von sieben Beobachtungsparametern zur Beschreibung der akustisch relevantesten Belageigenschaften. Von entscheidender Bedeutung für die akustischen Eigenschaften der Deckschicht ist dessen Korngrößenverteilung und diese variierte innerhalb der weiten Grenzen der SNR 640436. Der feinkörnige SDA 4 führte zu wesentlich weniger rauen Oberflächen als der SDA 8, verfügte über mehr Hohlraum und war auch deshalb im Mittel um rund 2 dB leiser als der SDA 8. Die akustische Performanz bei Bestellung eines SDA 4 oder SDA 8 Belags ist allein mit Verweis auf die SNR 640436 nicht hinreichend vorhersehbar.



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Die im Forschungsantrag skizzierten Ziele der Erfassung, Aus- und Bewertung der Varianz bautechnischer und akustischer Eigenschaften wurden in vollem Umfang erreicht. Dies führte zu wichtigen neuen Erkenntnissen über die Zusammenhänge zwischen Baupraxis, bautechnischen Laboruntersuchungen und der Messung akustischer Eigenschaften auf der eingebauten Strasse. Es ergaben sich konkrete Empfehlungen für eine Präzisierung der SNR 640436, deren Umsetzung zu einer besseren Vorhersagbarkeit der akustischen Belageigenschaften führen wird und zu einer geringeren Varianz der bautechnischen Eigenschaften. Zusätzlich konnte ein überschaubarer Satz von für die akustischen Eigenschaften besonders charakteristischen Parametern identifiziert werden mit Richtwerten, deren Einhaltung zur Umsetzung einer leisen Strasse erheblich beitragen würde.

Folgerungen und Empfehlungen:

Für die verschiedenen Hohlraumklassen sollten in der SNR 640436 spezifische Sieblinien vorgegeben werden. Es sollte der akkumulierte Kornanteil entlang der Sieblinie bis zum halben Grösstkorn mindestens 25 M.-% betragen. Vorgaben für den Hohlraumgehalt von SDA Belägen sollten ausschliesslich auf das Messverfahren D bezogen sein. In einem SDA 4B/C oder SDA 8B/C sollten folgende Zielvorgaben eingehalten werden: Akkumulierter Anteil der Sieblinie von mindestens 25 % beim halben Grösstkorn, Texturgestaltfaktoren von über 80 %, niedrige Effektivwerte der Oberflächenrauigkeit (beim SDA 4B RMS=0.4 mm, beim SDA 8B RMS=0.6 mm), ein breitbandiges Absorptionsspektrum mit Maxima von mindestens 0.2, Strömungswiderstände von unter 15'000 Pa s/m, Bohrkernhohlraumgehalte nach Verfahren D von mindestens 12 Vol.-%. Es ist unbedingt empfehlenswert, die zeitliche Entwicklung der hier untersuchten Deckschichten weiterhin zu beobachten, denn nur so kann beurteilt werden wie sich die Varianz beim Einbau auf die akustische und bautechnische Dauerhaftigkeit auswirkt.

Publikationen:

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Kneib

Vorname: Guido

Amt, Firma, Institut: Müller-BBM Schweiz AG, CH-4123 Allschwil

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

#### Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Elf der zwölf SDA-Beläge, die im Rahmen des Projektes EP10 begleitet wurden entsprechen vollumfänglich den durch den Bauherren vorgegebenen Anforderungen gemäss der Norm SNR 640 436.

Auf dieser Grundlage konnten zahlreiche akustische und bautechnische Parameter erfasst und deren Korrelationen untersucht werden. Als massgebliche Parameter erwiesen sich:

- Lärmwerte auf der Basis von CPX-Messungen
- Absorptionsgrad und Luftströmungswiderstand
- Textureigenschaften (Gestaltfaktor)
- Materialanalysen (Sieblinie)

Die Forschungsziele wurden erreicht, wobei zu berücksichtigen ist, dass sich alle Aussagen auf eine sehr begrenzte Anzahl von Teststrecken beziehen und dass die akustischen Eigenschaften nur einmal, unmittelbar nach der Herstellung, erhoben wurden.

Umsetzung:

Die Norm SNR 640 436 sieht als Verfahren für die Bestimmung des Hohlraumgehaltes das Verfahren D (Ausmessen) vor. Um Missverständnisse zu vermeiden, sollte in den Laborberichten obligatorisch das angewandte Verfahren explizit angegeben werden.

Aufgrund verschiedener Korrelationen erscheint es zweckmässig die Sieblinie weiter einzuschränken, um die akustische Wirkung der Beläge zu verstärken.

weitergehender Forschungsbedarf:

Untersuchung der zukünftigen Entwicklung der Belageigenschaften und der massgeblichen Parameterkorrelationen. Entwicklung einer Methode zum Nachweis von kommunizierenden Hohlräumen. Weiterentwicklung spezifischer Messmethoden und Parameterempfehlungen zur Charakterisierung der akustischen Eigenschaften von Strassenoberflächen.

Einfluss auf Normenwerk:

Die Forschungsergebnisse des EP10 sollten bei der Umsetzung der Regeln SNR 640 436 und SNR 640 425 in reguläre Normen Berücksichtigung finden.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name:

Seiler

Vorname:

Ludwig

Amt, Firma, Institut:

ASTRA

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:



## Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Das Verzeichnis der in der letzten Zeit publizierten Schlussberichte kann unter [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch) (Forschung im Strassenwesen --> Downloads --> Formulare) heruntergeladen werden.